

UNIVERSITE DE LILLE
FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

Année de soutenance : 2019

N°:

THESE POUR LE
DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le 12 Mars 2019

Par Kévin JEFFROY

Né le 13 décembre 1993 à Conflans-Sainte-Honorine

**CHIRURGIE GUIDEE EN IMPLANTOLOGIE ORALE : DU GUIDE
STATIQUE A LA NAVIGATION DYNAMIQUE**

JURY

Président :	Monsieur le Professeur Guillaume PENEL
Assesseurs :	Monsieur le Docteur Philippe ROCHER
	Monsieur le Docteur François BOSCHIN
	<u>Monsieur le Docteur Gilbert NAFASH</u>

Président de l'Université	:	Pr. J-C. CAMART
Directeur Général des Services de l'Université	:	P-M. ROBERT
Doyen	:	Pr. E. DEVEAUX
Vice-Doyens	:	Dr. E. BOCQUET, Dr. L. NAWROCKI et Pr. G. PENEL
Responsable des Services	:	S. NEDELEC
Responsable de la Scolarité	:	M. DROPSIT

PERSONNEL ENSEIGNANT DE L'U.F.R.

PROFESSEURS DES UNIVERSITES :

P. BEHIN	Prothèses
T. COLARD	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
E. DELCOURT-DEBRUYNE	Professeur Emérite Parodontologie
E. DEVEAUX	Dentisterie Restauratrice Endodontie Doyen de la Faculté
G. PENEL	Responsable du Département de Biologie Orale

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

K. AGOSSA	Parodontologie
T. BECAVIN	Dentisterie Restauratrice Endodontie
A. BLAIZOT	Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale.
P. BOITELLE	Prothèses
F. BOSCHIN	Responsable du Département de Parodontologie
E. BOCQUET	Responsable du Département d' Orthopédie Dento-Faciale
C. CATTEAU	Responsable du Département de Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale.
A. de BROUCKER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
M. DEHURTEVENT	Prothèses
T. DELCAMBRE	Prothèses
C. DELFOSSE	Responsable du Département d' Odontologie Pédiatrique
F. DESCAMP	Prothèses
A. GAMBIEZ	Dentisterie Restauratrice Endodontie
F. GRAUX	Prothèses
P. HILDELBERT	Responsable du Département de Dentisterie Restauratrice Endodontie
C. LEFEVRE	Prothèses
J.L. LEGER	Orthopédie Dento-Faciale
M. LINEZ	Dentisterie Restauratrice Endodontie
G. MAYER	Prothèses
L. NAWROCKI	Responsable du Département de Chirurgie Orale Chef du Service d'Odontologie A. Caumartin - CHRU Lille
C. OLEJNIK	Biologie Orale
P. ROCHER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
L. ROBBERECHT	Dentisterie Restauratrice Endodontie
M. SAVIGNAT	Responsable du Département des Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
T. TRENTESAUX	Odontologie Pédiatrique
J. VANDOMME	Responsable du Département de Prothèses

Réglementation de présentation du mémoire de Thèse

Par délibération en date du 29 octobre 1998, le Conseil de la Faculté de Chirurgie Dentaire de l'Université de Lille 2 a décidé que les opinions émises dans le contenu et les dédicaces des mémoires soutenus devant jury doivent être considérées comme propres à leurs auteurs, et qu'ainsi aucune approbation, ni improbation ne leur est donnée.

Aux membres du jury...

Monsieur le Professeur Guillaume PENEL

Professeur des Universités – Praticien Hospitalier

Section Chirurgie Orale, Parodontologie, Biologie Orale

Département Biologie Orale

- Docteur en Chirurgie Dentaire
 - Doctorat de l'Université René DESCARTES (Paris V)
 - C.E.S d'Odontologie Chirurgicale
 - Habilité à diriger des Recherches
-
- Vice-Doyen Recherche de la Faculté de Chirurgie Dentaire
 - Responsable du Département de Biologie Orale

Vous me faites l'honneur de présider ce jury et je vous en remercie. Vous avez été à mon écoute et m'avez donné de bons conseils quant à la réalisation de ma thèse. Veuillez trouver, dans ce travail, le témoignage de mon profond respect et de mon admiration.

Monsieur le Docteur Philippe ROCHER

Maître de Conférences es Universités – Praticien Hospitalier des CSERD

Section Réhabilitation Orale, Département Sciences Anatomiques

- Docteur en Chirurgie Dentaire
- Doctorat en Odontologie de l'Université de Lille 2
- Maîtrise des Sciences Biologiques et Médicales
- Diplôme d'Études Approfondies de Génie Biologique et Médicale - option Biomatériaux
- Diplôme Universitaire de Génie Biologique et Médicale
- Certificat d'Études Supérieures de Biomatériaux

Vous avez accepté spontanément de faire partie de mon jury et je vous en remercie. Je tiens à vous faire part, au travers de ce travail, de ma gratitude à l'égard de votre bienveillance envers les étudiants.

Monsieur le Docteur François BOSCHIN

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier des CSERD

Section Chirurgie Orale, Parodontologie, Biologie Orale

Département Parodontologie

- Docteur en Chirurgie Dentaire
- Doctorat en Odontologie de l'Université de Lille 2
- Diplôme d'Études Approfondies de Génie Biologique et Médicale
- Certificat d'Études Supérieures de Technologie des Matériaux utilisés en Art Dentaire
- Certificat d'Études Supérieures de Parodontologie
- Responsable du Département de Parodontologie

Vous me faites l'honneur de participer à ce jury. Je vous remercie pour l'enseignement dispensé dans les domaines de la parodontologie et de l'implantologie.

Monsieur le Docteur Gilbert NAFASH

Praticien Hospitalier des CSERD – Chargé d’Enseignement

Unité fonctionnelle Implantologie – D.U Implantologie

- Ancien Interne des Hôpitaux de Lille
- Docteur en Chirurgie Dentaire
- Master I Recherche Biologie Santé
- Attestation d’Études Approfondies en Odontologie
- Certificat d’Études Supérieures d’Odontologie Chirurgicale – Lille II
- Diplôme Inter-Universitaire de Carcinologie Buccale – Paris VII/XII

Je vous ai rencontré lors de mon année de T1 dans le service d’implantologie aux côtés des praticiens DU. En acceptant ma candidature dans cette option de dernière année, vous m’avez permis de confirmer mon attrait pour l’implantologie. Malgré un emploi du temps chargé, vous avez toujours su être là au bon moment pour m’écouter et m’éclairer sur l’ensemble de mes difficultés. Vous m’avez ainsi mené jusqu’à cette soutenance tant attendue et que j’espère honorable.

J’ai apprécié votre bienveillance à mon égard qui m’a donné envie de montrer le meilleur de moi-même.

Veillez trouver dans cet ouvrage toute ma reconnaissance, le témoignage de mon sérieux et de ma détermination. J’espère que ce dernier est à la hauteur de vos espérances.

Je dédie cette thèse...

Table des matières

Introduction	16
1 Généralités sur la navigation et la robotique chirurgicales	18
1.1 Définitions	18
1.1.1 Navigation chirurgicale	18
1.1.2 Robotique chirurgicale	19
1.2 Historique de la robotique médicale	19
1.2.1 Objectifs et intérêts des robots à usage médical.....	20
1.2.2 Premières utilisations jusqu'à nos jours	20
1.2.2.1 Chirurgie endoscopique	21
1.2.2.2 Télémanipulation.....	21
1.2.2.3 Robots miniatures spécialisés et robots intracorporels.....	21
1.3 Principes de la robotique médicale	22
1.3.1 Chirurgie assistée par ordinateur.....	22
1.3.2 Grandes étapes de la robotique médicale.....	23
1.3.2.1 Informations.....	24
1.3.2.2 Planification et simulation.....	24
1.3.2.3 Action	25
1.3.3 Classification des systèmes robotiques	26
1.3.3.1 Systèmes interactifs.....	26
1.3.3.2 Systèmes passifs	28
1.3.3.3 Systèmes actifs.....	29
1.3.3.3.1 Systèmes télé-opérés	30
2 Systèmes actuels d'assistance peropératoire de positionnement en chirurgie implantaire en fonction de leur implication	31
2.1 Importance de la précision en implantologie	32
2.1.1 Problématiques d'un implant mal positionné.....	32
2.1.2 Positionnement à main levée.....	34
2.2 Système semi-actif avec l'utilisation d'un guide chirurgical	35
2.2.1 Principe	35
2.2.2 Classification	35
2.2.2.1 Guide à appui muqueux	35
2.2.2.2 Guide à appui osseux	36
2.2.2.3 Guide à appui dentaire.....	36
2.2.2.4 Restriction de positionnement	37
2.2.3 Réalisation de guides par conception et fabrication assistées par ordinateur	38
2.3 Système passif avec la navigation chirurgicale	39
2.3.1 Principe de fonctionnement	39
2.3.1.1 Techniques de localisation spatiale	40
2.3.1.1.1 Électromécanique	40
2.3.1.1.2 Ultrasonique	40
2.3.1.1.3 Électromagnétique.....	41
2.3.1.1.4 Optique.....	41
2.3.1.2 Volume de suivi.....	42
2.3.1.3 Enregistrement par repère physique.....	43
2.3.1.4 Calibrage de l'instrument à suivre.....	46
2.3.2 Différents systèmes sur le marché.....	46
2.4 Système actif avec l'assistance robotisée	48
2.4.1 Principe de fonctionnement	48
2.4.2 Indication	48
3 Étude de la chirurgie par navigation au travers du système X-Guide®	50
3.1 Étape préopératoire	52
3.1.1 Examen clinique	52
3.1.2 Acquisition des données radiographiques et préopératoires	52
3.1.2.1 Positionnement du repère radio-opaque de référence	52

3.1.3	Planification informatique.....	55
3.1.3.1.1	Étapes informatiques.....	55
3.2	Étape peropératoire : transfert de la planification au site	59
3.2.1	Calibrage du système avant le début de l'intervention	59
3.2.2	Séquence opératoire de suivi dynamique	64
3.3	Étape postopératoire.....	67
4	Discussion sur l'utilisation d'un système d'assistance peropératoire	68
4.1	Revue de la littérature à propos des systèmes semi-actifs et passifs	68
4.1.1	Guide statique	68
4.1.1.1	Avantages.....	68
4.1.1.2	Inconvénients.....	70
4.1.2	Système passif de navigation	73
4.1.2.1	Avantages.....	73
4.1.2.2	Inconvénients.....	79
4.2	Critères décisionnels sur l'utilisation des systèmes d'assistance peropératoire.....	82
4.2.1	Indications	82
4.2.1.1	Communes aux deux systèmes.....	82
4.2.1.2	Propres aux guides statiques	82
4.2.1.3	Propres aux systèmes de navigation	83
4.2.2	Organigramme décisionnel récapitulatif.....	84
	Conclusion.....	88
	Figures	90
	Tableaux	92
	Références bibliographiques	93
	Annexes	99
	Annexe 1 : Cas de chirurgie guidée d'une réduction de crête osseuse (102)	99
	Annexe 2 : Cas de chirurgie guidée sur un patient édenté avec la réalisation préopératoire du bridge provisoire implanto-porté (106).....	105
	105
	Annexe 3 : Chirurgie guidée en Implantologie orale - Revue systématique	109

Introduction

L'implantologie orale peut être définie comme étant une discipline dont l'aboutissement consiste à la mise en place d'une racine artificielle (implant en titane) dans l'os maxillaire ou mandibulaire permettant de recevoir une dent artificielle.

Ces dernières années, nous assistons à un véritable essor de cette thérapeutique devenue une solution de choix dans le traitement des édentements. La « demande implantaire » est de plus en plus grande et ce phénomène s'explique notamment (1) :

- Par l'allongement de l'espérance de vie corrélé avec l'augmentation proportionnelle d'édentés. Selon les chiffres de l'Organisation Mondiale de la Santé, à partir de 65 ans une personne sur trois est complètement édentée.
- Par un accès aux soins dentaires encore trop faible pour une partie de la population en situation de précarité ou avec une couverture sociale inadaptée conduisant à une perte prématurée des dents.

L'engouement autour de l'implantologie a suscité un redoublement d'efforts de recherche et de développement associé à des technologies modernes notamment en matière d'imagerie. Le succès implantaire se révèle presque assuré mais dépend encore d'autres facteurs tels que la dextérité peropératoire ainsi que l'expérience du praticien.

Cela souligne la nécessité d'accroître la précision et la reproductibilité du geste. Il est donc légitime de s'intéresser à la gestion du positionnement de l'implant assisté par les technologies modernes.

Actuellement, pour la mise en place d'un implant, le chirurgien réalise généralement la chirurgie à main levée ou bien, plus rarement, à l'aide d'un guide chirurgical. Cet élément rigide fixé sur l'arcade, a pour objet d'aider l'opérateur à placer l'implant dans la position tridimensionnelle prévue lors de la planification implantaire. Ce transfert de données entre la phase de planification et la phase chirurgicale peut cependant être effectué par un autre grand système : la navigation chirurgicale.

L'objectif de cette thèse est d'exposer au lecteur ce nouvel outil thérapeutique disponible en chirurgie implantaire, d'en comprendre son principe de fonctionnement, ses caractéristiques et indications précises. L'étude nous permettra de déterminer quelle approche le praticien doit adopter pour sélectionner la technique de chirurgie guidée la plus adaptée en fonction du cas clinique.

Au travers d'une recherche bibliographique, ce travail s'articule en 4 grandes parties. Il débutera par un rappel des généralités sur la robotique médicale, préalable à une présentation des différentes techniques actuelles de positionnement tridimensionnel précis en implantologie. Ensuite, viendra l'étude de la navigation chirurgicale avec le système X-Guide®. Ce système américain figure comme l'un des appareils récents les plus cités dans les dernières publications scientifiques sur le sujet. Enfin, une discussion sur la pertinence de cette technique face au guide statique clôturera l'ouvrage.

Dans l'intention de rendre le fruit de ce travail de recherche plus accessible, une revue de littérature établie dans le cadre de cette thèse est joint en annexe (annexe 3). Sa publication peut être envisagée sous réserve d'une validation ou d'une correction par le jury.

1 Généralités sur la navigation et la robotique chirurgicales

1.1 Définitions

Navigation et robotique chirurgicales sont étroitement liées (Figure 1). Ce sont toutes les deux des techniques assistées par ordinateur issues de la **robotique médicale** pour l'aide opératoire. (2)

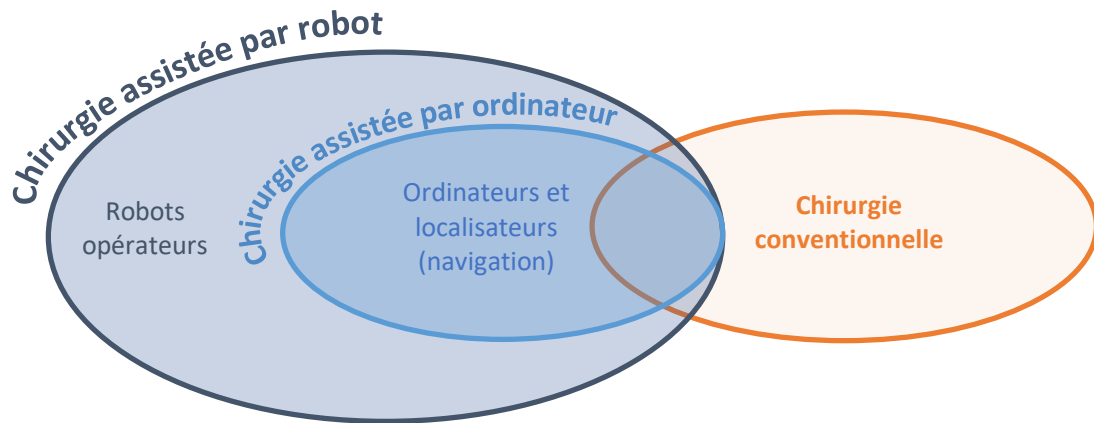


Figure 1 : Relation entre la chirurgie assistée par ordinateur (navigateur/localisateur) et la robotique chirurgicale, d'après Rodriguez F. (2)

1.1.1 Navigation chirurgicale

La navigation est une technique informatique couplée à l'imagerie pour l'assistance chirurgicale peropératoire. Elle a pour but d'aider le chirurgien à atteindre une cible préalablement déterminée en le guidant virtuellement durant l'intervention. Cette cible peut être de nature variable à savoir : une tumeur, une région anatomique ou une position.

Pour ce faire, l'opérateur utilise un navigateur ou système de navigation qui est une machine fonctionnant sur le principe du GPS. Elle possède un localisateur permettant de suivre la position et l'orientation des objets (instruments, structures anatomiques) en temps réel. L'information sur le geste opératoire est délivrée par un écran superposant le geste en cours sur des données pré- ou per- opératoires (scanner, IRM, échographie...). Enfin, un ordinateur muni d'un logiciel dédié s'occupe de traiter et d'intégrer l'ensemble des informations au cours de l'opération. (3)

Le chirurgien est alors à même de suivre la progression de l'instrument utilisé et, par exemple, de l'aligner sur des axes mécaniques ou des plans de coupe matérialisés lors de la planification chirurgicale (4).

1.1.2 Robotique chirurgicale

Un robot peut être défini comme un appareil automatique capable d'effectuer des opérations selon un programme fixe, modifiable ou adaptable (5). La robotique chirurgicale est, quant à elle, la discipline faisant intervenir des systèmes robotisés assistés par ordinateur. Il faut considérer d'abord l'assistance informatique puis le robot chirurgical qui est un élément d'un système global destiné à accompagner le chirurgien dans le bon déroulement de la procédure chirurgicale, que cela soit avant, pendant, ou après l'opération (6).

Ainsi, la robotique chirurgicale concurrence la navigation chirurgicale. C'est donc en fonction des besoins opératoires que le chirurgien fera le choix d'utiliser l'un ou l'autre de ces systèmes parmi l'arsenal thérapeutique à sa disposition.

1.2 Historique de la robotique médicale

Le terme « robot » a été introduit par l'écrivain tchèque *Karel Capek* en 1921 dans sa pièce de théâtre « *Rossum's Universal Robots* ». Ainsi, le mot « robot » provient du mot tchèque « *robota* » qui signifie « travail, corvée ». Plus tard, en 1942, *Isaac Asimov*, inspiré par les travaux de Capek définit le terme « robotique » et formule les 3 lois de la robotique dans ses œuvres *Runaround* et *I Robot* (7) (8):

- 1^{ère} loi : Un robot ne peut porter préjudice à un être humain, ou, par inaction, laisser un être humain subir un préjudice.
- 2^{ème} loi : Un robot doit obéir aux ordres qui lui sont donnés par des êtres humains, sauf dans le cas où de tels ordres entrent en conflit avec la Première Loi.
- 3^{ème} loi : Un robot doit protéger sa propre existence aussi longtemps qu'une telle protection n'entre pas en conflit avec la Première ou la Seconde Loi.

La propriété fondamentale d'un système robotique se manifeste par sa capacité d'associer des informations complexes à des actions physiques dans le but de réaliser une tâche utile à l'homme. Le système robotique a pour finalité de remplacer, compléter ou dépasser la capacité humaine.

1.2.1 Objectifs et intérêts des robots à usage médical

Le monde médical fait partie des secteurs où les robots se développent considérablement. A l'origine de la chirurgie mini-invasive, ils permettent aujourd'hui la réalisation de traitements ciblés, l'optimisation des actes opératoires (précision, gain de temps, sécurité), l'assistance à domicile, sans oublier l'assistance prothétique. (9)

1.2.2 Premières utilisations jusqu'à nos jours

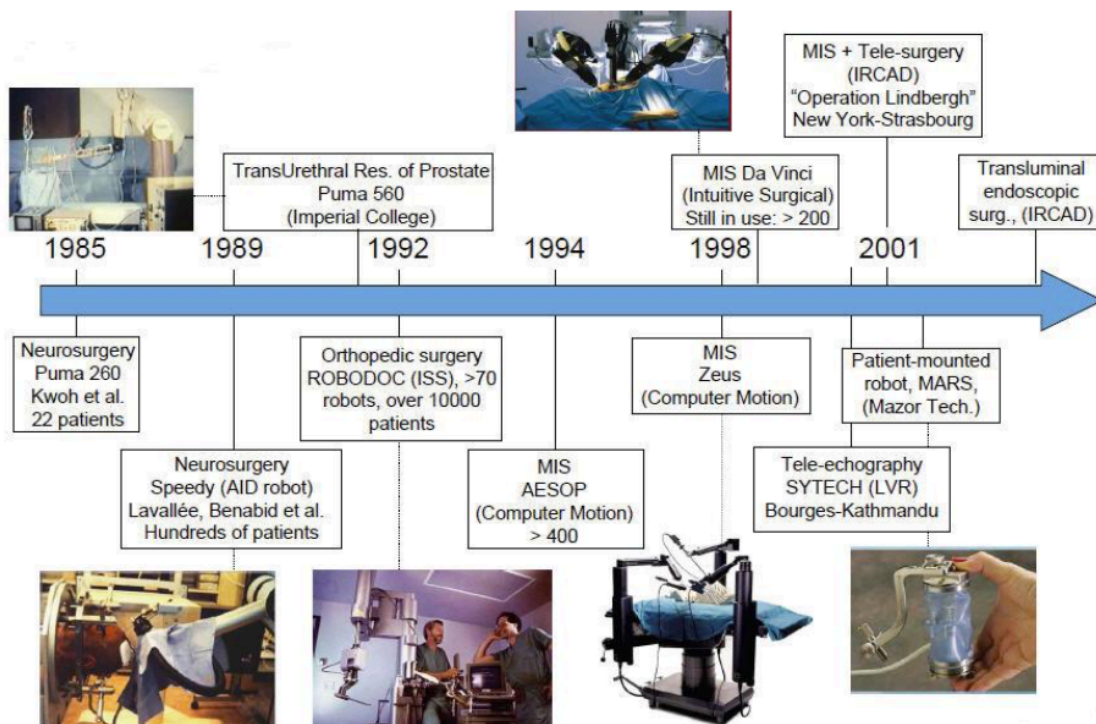


Figure 2 : Repères chronologiques en robotique médicale, Troccaz J. (3)

Introduite au début des années 1980, la robotique médicale était centrée au départ dans le domaine de la neurochirurgie. L'utilisation principale était la navigation chirurgicale notamment dans le cadre de biopsies cérébrales. La première intervention sur l'homme a eu lieu en 1985 avec le robot PUMA® (Programmable Universal Manipulation Arm). (10)

De manière chronologique, l'histoire de la robotique chirurgicale est échelonnée par d'importantes étapes (Figure 2) :

1.2.2.1 Chirurgie endoscopique

D'abord, à partir des années 1990, la chirurgie endoscopique fait son apparition. Profitant des avancées technologiques dans le domaine de l'optique et de l'imagerie vidéo, ce type de chirurgie dite mini-invasive deviendra une référence en terme de réduction du traumatisme opératoire (11). Le robot AESOP® (Automated Endoscopic System for Optimal Positioning) mis au point en 1994 et muni d'un endoscope représente le symbole de la chirurgie mini-invasive dans laquelle le chirurgien se concentre sur l'image du site opératoire retransmise en temps réel (12).

1.2.2.2 Télémanipulation

Cinq ans plus tard, la téléchirurgie est développée. En plus de bénéficier d'une vision indirecte du site opératoire, le chirurgien peut commander, à distance et à partir d'une console, des robots à bras articulés. L'objectif est avant tout d'accroître la dextérité du chirurgien en permettant par exemple de filtrer ses tremblements physiologiques et de découpler ses possibilités de mouvement. L'exemple de téléchirurgie le plus connu est l'intervention chirurgicale réalisée par le professeur Marescaux en 2001 : ce dernier a opéré depuis New York une patiente située à Strasbourg. (12)

1.2.2.3 Robots miniatures spécialisés et robots intracorporels

Plus récemment, une autre classe de robots se distingue. Plus petits, moins chers et indiqués pour des tâches bien spécifiques, ils concurrencent les robots opérateurs précités. Ils sont bien souvent fixés au patient lui-même permettant de faciliter le repérage spatial. Dans cette catégorie de robots miniatures se trouvent, en grande partie, des appareils de guidage tels que le robot MARS® (Miniature Robot for Surgical procedures) utilisé pour le vissage pédiculaire dans le cadre d'opération du rachis (2001).

Enfin, un tout autre type de robot dit intracorporel se développe de plus en plus. Toujours dans un but de réduire au maximum le caractère invasif d'une intervention et son coût, ces robots de l'ordre de quelques millimètres, sont placés à l'intérieur du patient pour exécuter l'opération. (13)

De par ces recherches sur l'historique de la robotique médicale, il convient de comprendre que les robots chirurgicaux sont utilisés depuis environ 35 ans et de manière quotidienne. Aussi, les avancées technologiques ont un rythme très soutenu permettant toujours plus de possibilités dans davantage de spécialités médicales. De nombreuses études, approbations et certifications ont permis d'aboutir au fait que le bien-fondé de leur utilisation n'est plus à démontrer (14). A titre d'exemple, le robot Da Vinci® (téléchirurgie) a exécuté 877 000 interventions au cours de l'année 2017 (15).

1.3 Principes de la robotique médicale

Contrairement à la robotique industrielle, la robotique médicale se doit de respecter trois grandes règles :

La **sécurité** à proximité du patient et des soignants doit être assurée. Cela correspond à la première loi d'Asimov.

L'**asepsie** est la seconde contrainte rencontrée en robotique chirurgicale. Tous les éléments en contact avec le patient et le chirurgien devront être :

- Soit stérilisés par procédé classique d'autoclave
- Soit jetables sous conditionnement stérile
- Soit placés sous champ plastique stérile

La **salle d'opération** présente de nombreuses difficultés à surmonter. Elle implique de réduire le plus possible la place occupée par le système et le respect de l'ergonomie. L'installation et le rangement doivent être simples à effectuer.

1.3.1 Chirurgie assistée par ordinateur

Les avancées radiologiques et informatiques ont permis le passage de l'étude bidimensionnelle à l'étude tridimensionnelle par l'utilisation de la tomodensitométrie jusqu'au traitement numérique de l'information par le biais de logiciels de simulation implantaire. C'est ce que l'on appelle la **Chirurgie Assistée par Ordinateur (CAO)**, à ne pas confondre avec le sigle CFAO (Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur).

La CAO affiche de nombreux atouts (16) :

- Nouvelles options de traitement et amélioration de la qualité de la technique opératoire
- Gain de temps et diminution du coût
- Réduction du caractère invasif de l'opération
- Sécurité
- Retour d'information et contrôle en temps réel
- Précision
- Amélioration de la pratique chirurgicale par la collecte importante d'informations

La CAO rassemble les différents outils informatiques destinés à aider le chirurgien dans la préparation et la réalisation d'une opération. Cela comprend les logiciels (de simulation, planification et intervention), les systèmes de localisation et de traitement numérique des clichés d'imagerie, des appareils de réalité augmentée, des robots chirurgicaux, etc. Son utilisation se retrouve dans le diagnostic radiologique, la planification préopératoire, la simulation des solutions thérapeutiques, l'aide peropératoire et le contrôle postopératoire ainsi que le suivi (6) (17).

1.3.2 Grandes étapes de la robotique médicale

Dans le cadre d'une chirurgie assistée par ordinateur, la finalité est d'avoir la corrélation la plus fidèle possible entre la planification et le résultat de l'opération chirurgicale. Il importe de bien comprendre comment intervient la CAO dans les trois grandes étapes de ce type de chirurgie (Figure 3) (18) (19) :

1. Informations
2. Planification et simulation à l'aide du modèle virtuel
3. Action

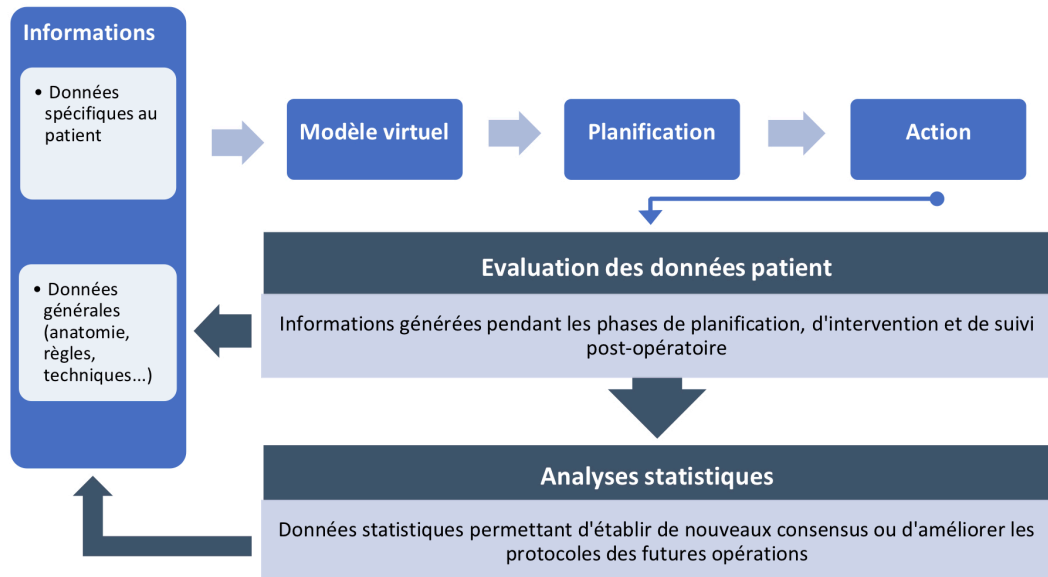


Figure 3 : Processus conventionnel de la CAO, Taylor R. (18)

1.3.2.1 Informations

Le processus débute par la collecte de toutes les informations concernant le patient pouvant être utiles à l'intervention. Cela regroupe notamment les images radiographiques numériques (CT, IRM, TEP) mais aussi tests médicaux, examens cliniques, etc. Il en résulte des images tridimensionnelles très précises de la zone anatomique à traiter.

Une fois obtenues, ces informations spécifiques au patient sont combinées avec les données générales de l'homme (anatomie, physiologie, etc.) afin de produire une représentation informatique du patient qui sera utilisée pour préciser les diagnostics et élaborer la planification d'intervention (Figure 3).

1.3.2.2 Planification et simulation

Lors de cette étape, l'assistance par ordinateur permet au chirurgien de programmer son intervention. Grâce aux informations et données d'imagerie, il peut choisir la technique chirurgicale, les matériels et matériaux à utiliser (Figure 3).

Sur les logiciels de planification, il a la possibilité de simuler l'intervention. Cela permet d'apporter d'éventuelles modifications, de s'assurer de la faisabilité de l'acte, de prévisualiser les résultats attendus et d'anticiper des complications. Il pourra par exemple procéder à la réalisation d'un guide statique de positionnement. Dans le domaine de l'implantologie orale, cela correspond à la fabrication du guide chirurgical.

Pour que la simulation soit exploitable, les paramètres anatomiques du patient doivent rester identiques entre l'acquisition et l'intervention ou alors être enregistrés et mis à jour sur la simulation. De plus, il ne faut pas d'erreur lors de l'acquisition ou lors du transfert d'informations de la planification au site d'intervention.

Par exemple, pour une chirurgie implantaire, l'opérateur peut placer à l'échelle et de manière tridimensionnelle les futurs implants dentaires dans l'arcade. La position choisie sera guidée par la prothèse.

1.3.2.3 Action

Au bloc opératoire, la CAO propose au chirurgien trois grands modes d'assistance : le **guidage statique**, la **navigation** et la **chirurgie robot-assistée**.

Avant de commencer l'acte opératoire, une étape obligatoire de correspondance entre le patient et son modèle virtuel est nécessaire : c'est l'étape du « matching ». Il faut garder à l'esprit que la plupart des robots opérateurs possèdent un système de navigation interne (20). Cela explique pourquoi navigation et chirurgie robot-assistée sont étroitement liées.

Pendant l'intervention, la progression de l'opérateur est surveillée par des capteurs et des moyens d'imagerie. Cela permet de mettre à jour le modèle virtuel et de vérifier que la procédure planifiée est respectée.

Dans le cas du guidage statique (guide chirurgical d'implantologie par exemple) il n'y a pas de suivi, le déroulement de l'opération n'est pas modifiable. Le guide donne seulement un axe (ou une position) prédéfini(e) à la planification. Le modèle virtuel ne peut pas être mis à jour.

Une fois la chirurgie terminée, les données patients sont évaluées et analysées statistiquement (Figure 3).

1.3.3 Classification des systèmes robotiques

Dans la littérature, il existe différents moyens de classer les systèmes robotiques. La classification la plus répandue et admise par les principaux auteurs du champ de la robotique médicale s'appuie sur la nature du contrôle laissé au chirurgien pendant l'intervention : il s'agit de la classification établie par S. Lavallée en 1991 et modifiée par J. Troccaz en 2001 (21) (22). Se distinguent alors les systèmes interactifs, passifs, actifs et actifs télé-opérés (23). La présentation des différents systèmes s'effectuera de cette manière dans l'ensemble de l'étude. Cela permet d'aborder ces outils dans le même ordre que leur développement chronologique en chirurgie dentaire.

1.3.3.1 Systèmes interactifs

Le robot agit en tant qu'assistant pendant l'opération en permettant au chirurgien de diriger l'instrument de manière stable dans une position prédéfinie. Ces appareils offrent alors un guidage mécanique précis, au sein du site opératoire, pour le chirurgien qui doit essentiellement se concentrer sur la progression instrumentale (Figure 4) (24).

Cette classe regroupe initialement les outils dits « **semi-actifs** » ne permettant aucune modification une fois la planification réalisée. Elle a été élargie pour intégrer des appareils dits « **synergiques** ». Le système est synergique à partir de l'instant où la contrainte mécanique soumise au chirurgien est programmable (25). La contrainte mécanique correspond à la limitation des gestes chirurgicaux, imposée par le robot au chirurgien. Par exemple, un système synergique peut limiter les mouvements de l'outil selon une direction (verticalement) tout en laissant le chirurgien effectuer un déplacement de ce même outil, dans une autre direction (horizontalement).

Si l'on fait un parallèle avec le domaine de l'implantologie orale, cette classe de systèmes regroupe les guides chirurgicaux que nous utilisons au quotidien. Bien que nos guides ne peuvent pas être définis comme des robots mais plus comme des instruments, leur fonction de guidage est une fonction **semi-active**.

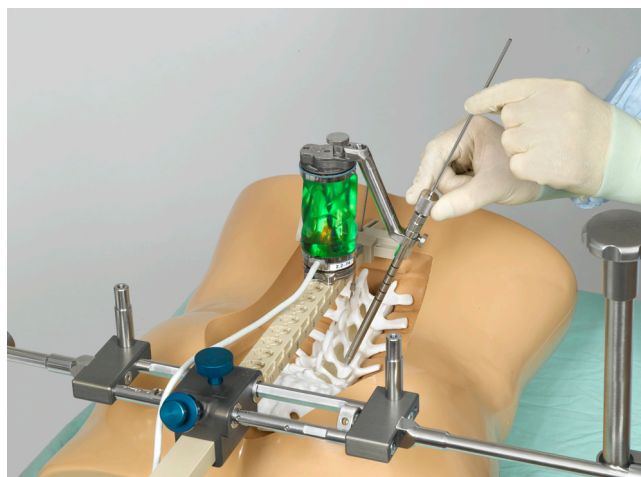


Figure 4 : Système semi-actif Mazor SpineAssist[®], Divi S. (26)

Sur cette illustration, le Mazor SpineAssist[®] permet une insertion minimalement invasive précise de vis pédiculaires. C'est un outil interactif semi-actif car, placé sur le site opératoire, il offre un guidage mécanique au chirurgien. La progression du forage est effectuée seulement par le chirurgien sans intervention du robot. Afin d'éclaircir la notion de synergie, dans cet exemple, s'il était possible de programmer un frein ou une action du robot sur le forage exécuté par l'opérateur, alors on se trouverait dans le cadre d'un système interactif synergique.

1.3.3.2 Systèmes passifs

Les systèmes passifs n'effectuent pas d'acte chirurgical sur le patient et n'opposent aucune contrainte mécanique au chirurgien. Ils ont pour objectif d'assister le praticien dans les étapes de planification ainsi que de simulation et le guident précisément pendant la chirurgie en ne fournissant que des informations (27). Le chirurgien a la maîtrise totale de la procédure (Figure 5). De plus en plus de systèmes passifs disposent néanmoins d'un contrôle caractérisé par une contrainte de dynamique effectuée par le robot. Le but est de prévenir des erreurs en cadrant des zones de fonctionnement autorisée par exemple (28). Les informations transmises au chirurgien lui permettent de comparer la situation per-opératoire avec celle planifiée. La navigation chirurgicale est le système passif le plus connu. (10)

En implantologie orale, les systèmes de navigation sont encore méconnus pour une majeure partie des praticiens. Adaptés depuis bientôt une vingtaine d'années à l'odontologie, ces outils ne suscitent pas encore un profond intérêt, bien souvent à cause de leur complexité apparente et de l'investissement qu'ils nécessitent. Cependant, actuellement en pleine croissance, de plus en plus de systèmes sont développés à des coûts plus abordables avec une courbe d'apprentissage de plus en plus accessible.

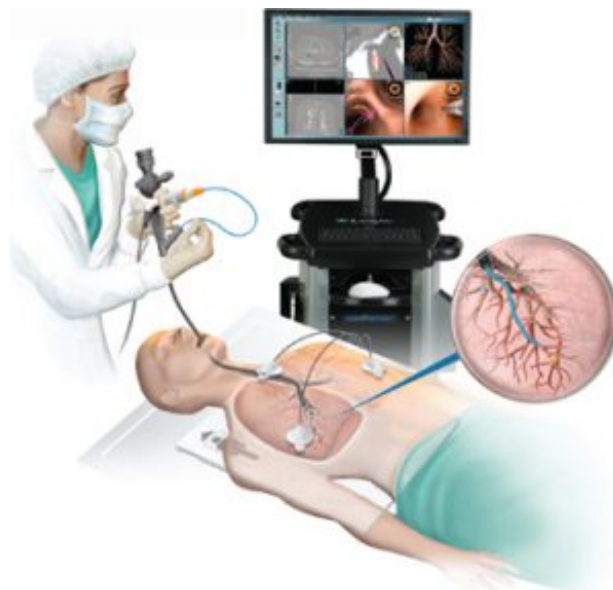


Figure 5 : Système passif de chirurgie par navigation électromagnétique.
<https://longshortreport.com> (29)

1.3.3.3 Systèmes actifs

Les systèmes actifs exécutent un acte opératoire à un certain degré d'autonomie sans l'intervention directe du chirurgien mais sous sa surveillance (Figure 6). Cette autonomie implique que le robot doit être capable de percevoir l'environnement et de s'adapter aux nouveaux paramètres pouvant survenir. Par ailleurs, même si les systèmes autonomes montrent une supériorité en termes de précision et de caractère non invasif, les systèmes contrôlés par un opérateur sont plus performants dans la prise de décision lors d'évènements imprévus (25).

Il est important de comprendre que dans cette classe de robots, il existe différents niveaux hiérarchiques sur l'autonomie permise au système. Des experts en robotique ont défini ces niveaux allant d'un premier degré où toutes les décisions sont prises par l'homme jusqu'à un système où l'ordinateur commandant le robot décide de l'ensemble des actes de manière autonome, en ignorant l'homme (30). Ce « robot chirurgical » d'une complète autonomie n'existe aujourd'hui que dans la fiction (9).

Les systèmes actifs à destination de l'implantologie orale sont encore dans le domaine de la recherche. Ils se présenteront comme un robot autonome capable d'insérer l'implant dans l'arcade du patient à la position prédéfinie lors de la planification. (31)

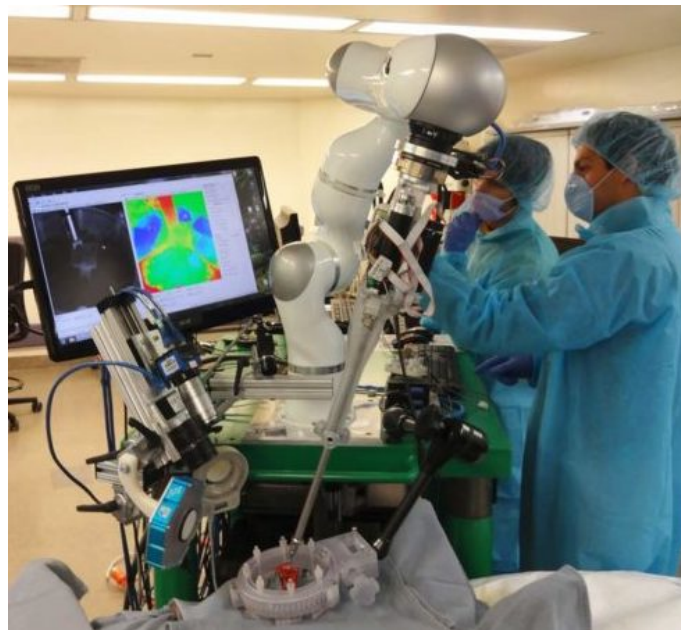


Figure 6 : Système actif autonome STAR®, Shademan A. (32)

1.3.3.3.1 Systèmes télé-opérés

Ce sont les robots médicaux les plus utilisés aujourd'hui (Figure 7). C'est une sous-classe de systèmes actifs, de premier degré d'autonomie (9). Le praticien peut opérer sans avoir à être derrière le robot ou même dans la salle d'opération. Dans le cadre de la chirurgie télé-opérée, le chirurgien installé dans un module de commande dispose d'une vision binoculaire du champ opératoire. Il contrôle les instruments grâce à des « joysticks » et des pédales. Le module central porte-instrument exécute les commandes et opère le patient. Enfin, un assistant opératoire surveille sur un écran de contrôle le bon déroulé de l'opération (33).

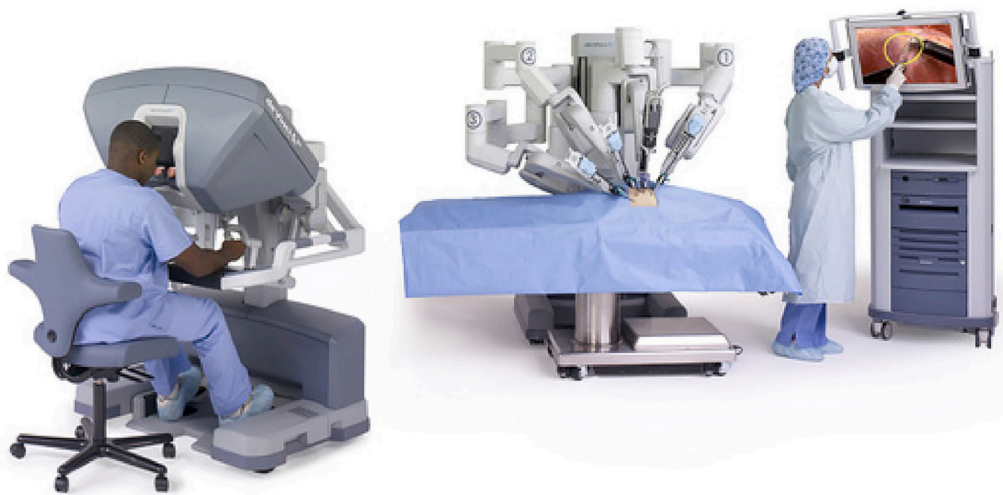


Figure 7 : Système télé-opéré Da Vinci®, Guillemin F. (33)

2 Systèmes actuels d'assistance peropératoire de positionnement en chirurgie implantaire en fonction de leur implication

Après avoir défini lors de la planification les caractéristiques de l'implant (longueur, diamètre, type) et la position, le praticien doit faire le choix de la technique qu'il compte employer pour positionner l'implant. Plusieurs obstacles sont à considérer (34) :

- Mouvements involontaires du patient pendant le forage
- Temps limité de l'anesthésie locale
- Champ de vision restreint du site opératoire
- Complexité du transfert mental des informations tridimensionnelles des images au site opératoire
- Implants multiples à positionner
- Proximité d'obstacles anatomiques
- Esthétique et gestion des tissus mous
- Respect de règles biomécaniques et fonctionnelles de la future prothèse (courbes d'occlusion...)

Le chirurgien fera son choix en fonction de son expérience, des données du patient et du besoin de précision qu'il cherche à atteindre. Ainsi, dans le cas où il souhaite être le plus fidèle à sa planification, il s'orientera vers un système d'assistance peropératoire de positionnement dit de chirurgie guidée. (35)

2.1 Importance de la précision en implantologie

Le bon positionnement tridimensionnel de l'implant selon les paramètres : point d'émergence, axes et profondeur, est un des facteurs déterminants du succès implantaire à court, moyen et long termes (36).

2.1.1 Problématiques d'un implant mal positionné

Pendant longtemps, les chirurgiens étaient tentés de placer les implants là où il y avait suffisamment d'os, sans forcément tenir compte de la prothèse finale implanto-portée. Il a été cependant démontré qu'une variation même minime de la position initialement prévue de l'implant pouvait provoquer des complications pour la réalisation des prothèses (37).

Un implant incorrectement positionné peut être à l'origine de nombreuses complications (38) :

- Défaut de tissu kératinisé autour de l'implant
- Insatisfaction esthétique
- Exposition du col implantaire
- Anomalie biomécanique
- Profil d'émergence inadéquat
- Difficultés d'hygiène orale
- Atteintes parodontales
- Changement du plan de traitement ou prolongation
- Implant inutilisable prothétiquement
- Défaillance de la structure supra-implantaire
- Impossibilité de vissage
- Morsure jugale persistante

Certaines situations cliniques requièrent ainsi un positionnement implantaire précis, d'autant plus dans les zones esthétiques. Le concept des « zones de danger et de confort » (Figure 8) a été introduit en 2003 par *Buser et al.* pour sensibiliser les praticiens sur l'impact du positionnement des implants antérieurs. Il délimite les zones de positionnement à risques dans les trois dimensions de l'espace. (39) (40)

Selon ce concept :

- Dans le sens mésiodistal l'implant est positionné à une distance de 1 à 1,5 mm des dents adjacentes (Figure 8a).
- Dans le sens apico-coronaire, l'épaulement du col implantaire d'un implant transgingival (Tissue Level) se situe 1 mm en dessous de la jonction amélo-cémentaire des dents adjacentes (Figure 8b). Dans le cas d'un implant enfoui (Bone Level), la plateforme implantaire doit se situer 2 à 3 mm sous cette jonction amélo-cémentaire. (41)
- Dans le sens vestibulo-lingual, le point d'émergence vestibulaire de l'implant doit être en retrait d'1 mm côté lingual par rapport au point d'émergence des dents adjacentes (Figure 8c).

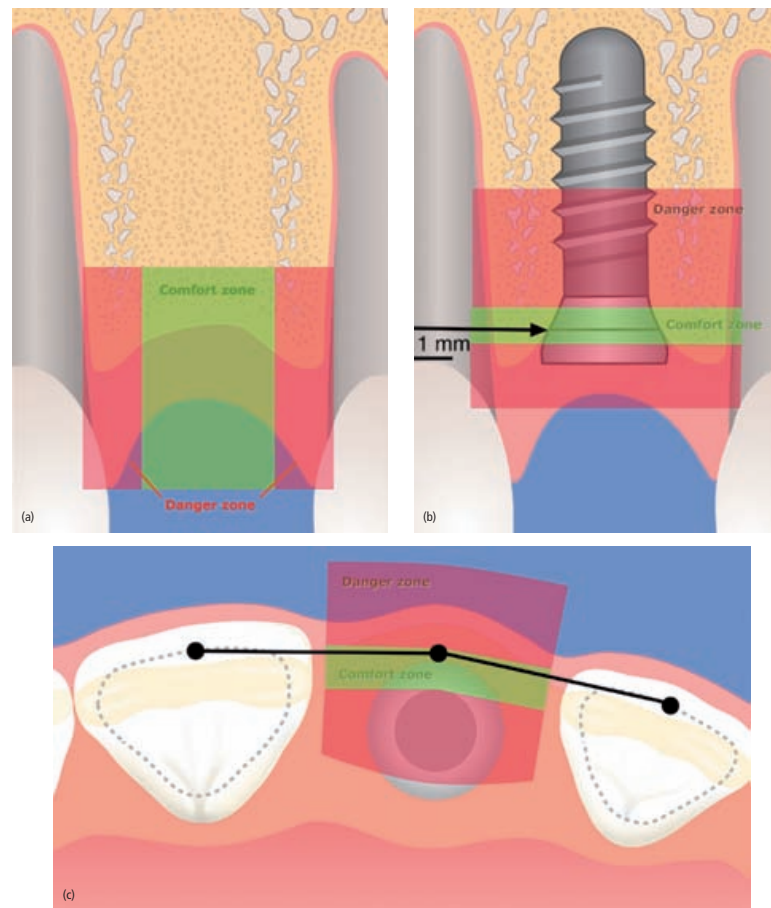


Figure 8 : Concept de zones de confort et de danger dans les 3 dimensions de l'espace, Wiley J. (39)

Pour répondre à cette nouvelle exigence du résultat esthétique, un changement de paradigme a eu lieu. L'implantologie n'est alors plus guidée par les exigences chirurgicales mais par les exigences prothétiques. L'objectif est de placer l'implant en fonction de la position idéale de la future restauration prothétique. (17)

2.1.2 Positionnement à main levée

Cette technique conventionnelle consiste à positionner l'implant sans aucun système de guidage. Elle est tributaire de l'expérience et de la dextérité du praticien qui s'appuie sur les analyses radiographiques, les sondages effectués à l'aide d'une sonde parodontale et les mesures prises avec un pied à coulisse.

Dans la littérature (42–44), il est admis que le positionnement à main levée est inférieur en terme de précision par rapport à tous les systèmes peropératoires de chirurgie guidée, soit, les systèmes semi-actifs, les systèmes passifs de navigation ou encore les systèmes actifs. Une confrontation entre le guide statique, la navigation dynamique et la technique à main levée sera traitée dans la partie de discussion. Cela permettra de rendre compte des différents degrés de précision offerts par chacune des techniques.

2.2 Système semi-actif avec l'utilisation d'un guide chirurgical

2.2.1 Principe

Ce système, dit statique, transfère dans le champ opératoire la position prédéfinie des implants sous la forme d'un support, le guide chirurgical (45). Il se présente comme un appareil amovible en résine et possède des canons de forage (douilles) permettant le placement de l'implant selon les prévisions de la planification. C'est le moyen de guidage chirurgical le plus couramment utilisé en implantologie. Aujourd'hui, les guides sont de plus en plus fabriqués par stéréolithographie avancée (impression 3D).

2.2.2 Classification

Les guides chirurgicaux s'adaptent à la situation clinique de telle manière à obtenir le meilleur appui sur les éléments disponibles. Ainsi, on distingue trois types de guide en fonction de leur appui.

2.2.2.1 Guide à appui muqueux

Ce guide, davantage utilisé chez le patient édenté total, s'appuie sur la muqueuse (Figure 10b). Du fait de la dépressibilité de la muqueuse, il doit être stabilisé grâce à des vis transcorticales permettant de lui assurer plus de stabilité. Il faut cependant veiller à utiliser une clé rigide de positionnement occlusale en résine avant la stabilisation, sous peine de faire basculer le guide dans une direction erronée lors de la mise en place des clavettes (Figure 9). (17)

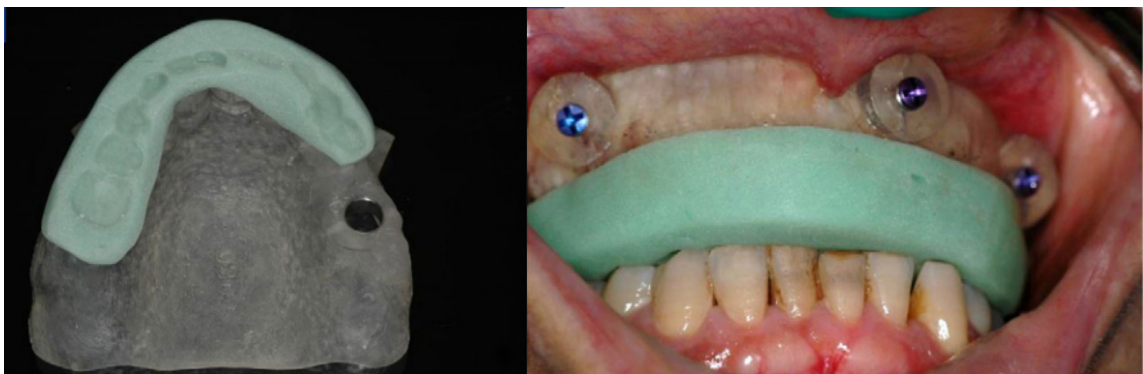


Figure 9 : Stabilisation du guide chirurgical à l'aide d'une clé en résine, Davarpanah K. (46)

2.2.2.2 Guide à appui osseux

Rigide, l'os confère une bonne stabilité initiale pour ce type de guide (Figure 10a). Mais à cause de sa surface lisse, l'utilisation de vis ou de clavette de la même manière que pour le guide muqueux peut s'avérer nécessaire. Ce type de guide implique une levée de lambeau. (17)

2.2.2.3 Guide à appui dentaire

Il est décrit comme le plus stable et le plus précis des guides semi-actifs et se trouve particulièrement indiqué dans le cadre d'un édentement encastré (Figure 10c). Simple de réalisation et de mise en place, il s'appuie sur les dents adjacentes à l'édentement. Devant un édentement terminal, il pourra également être utilisé mais le risque de déformation et d'erreur est plus élevé. (17)

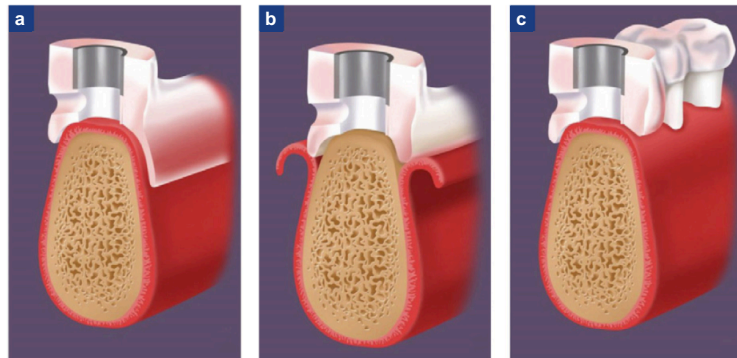


Figure 10 : Illustrations des guides à appui muqueux (a), osseux (b), dentaire (c), Davarpanah K. (46)

2.2.2.4 Restriction de positionnement

En fonction de leur fabrication, les guides peuvent être (47) :

- **Non limitants** : ils présentent une percée objectivant le point idéal d'émergence de l'implant (Figure 11). L'opérateur évaluera lui-même les axes et la profondeur à respecter lors du forage.
- **Semi-limitants** : dans ce cas, le passage du foret pilote se fera au travers du guide. Cela permettra d'indiquer les axes à respecter par la suite lors de la pose à main levée. Une bague en titane de type douille sera incorporée dans la résine pour garantir un guidage parfait et protéger l'appareil (Figure 12).
- **Limitants** : ils seront utilisés pour toute la séquence opératoire et le passage des différents forets. Des butées placées sur les forets d'ostéotomie permettront le respect de la profondeur planifiée. Le contrôle des axes sera géré par l'intermédiaire de cuillères, adaptées aux bagues en titane, en fonction des différents diamètres de foret (Figure 13). L'insertion de l'implant peut se faire au travers du guide pour un positionnement totalement guidé ou sans le guide pour un positionnement partiellement guidé (42).

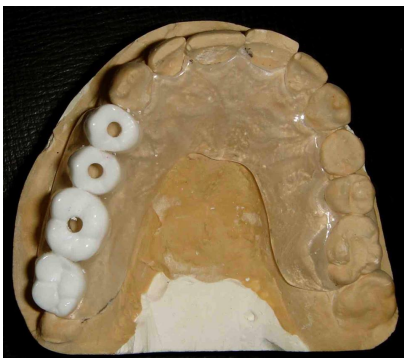


Figure 11 : Guide à appui muqueux non limitant, <http://www.centreschneck.fr> (48)



Figure 12 : Guide à appui dentaire semi-limitant, <http://www.studio32dental.com> (49)

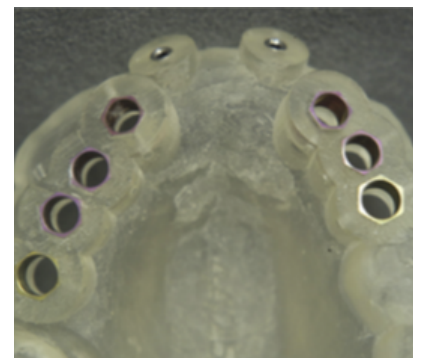


Figure 13 : Guide à appui muqueux limitant, Block M. (50)

Quel que soit son type d'appui, un guide peut être fabriqué de façon à offrir la limitation choisie par le chirurgien. De nos jours, ce sont principalement les guides non limitants à appui dentaire qui sont utilisés lors d'une intervention sous chirurgie guidée. Cela permet de diminuer l'imprécision par rapport à un guide non limitant appui muqueux (Figure 11).

En somme, plus le guide sera limitant et plus l'opérateur sera contraint de suivre ce qu'il avait programmé au préalable, même devant un imprévu lors de la chirurgie.

2.2.3 Réalisation de guides par conception et fabrication assistées par ordinateur

Depuis que l'implantologie assistée par ordinateur (IAO) existe, il est possible de réaliser le guide chirurgical selon la position prévue du futur implant. Le guide chirurgical est alors construit virtuellement directement sur le logiciel de planification puis envoyé au laboratoire pour être fabriqué (Figure 14). (17)

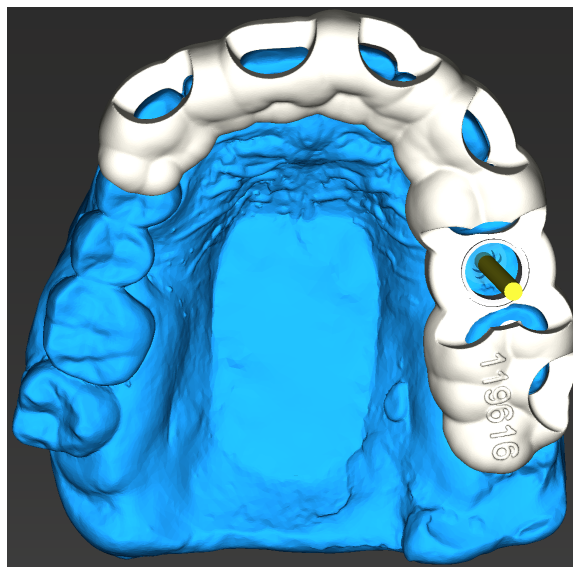


Figure 14 : Guide chirurgical dento-porté virtuel réalisé à l'aide d'un logiciel de planification, <http://canaray.com> (51)

2.3 Système passif avec la navigation chirurgicale

2.3.1 Principe de fonctionnement

Tel qu'il a été évoqué dans les généralités médicales, le principe reste le même dans le domaine de l'implantologie. La navigation permet au chirurgien de visualiser son geste dans le site implantaire tout au long de la chirurgie (Figure 15). La position planifiée de l'implant est transposée à l'aide d'outils de localisation. L'écran de contrôle diffuse les reconstructions tridimensionnelles mises à jour en temps réel objectivant le forage. Toute déviation par rapport à la simulation est détectée et des changements peuvent être effectués sans devoir abandonner toute la planification (52). En résumé, le système de navigation fournit un gabarit chirurgical virtuel et modifiable (45).

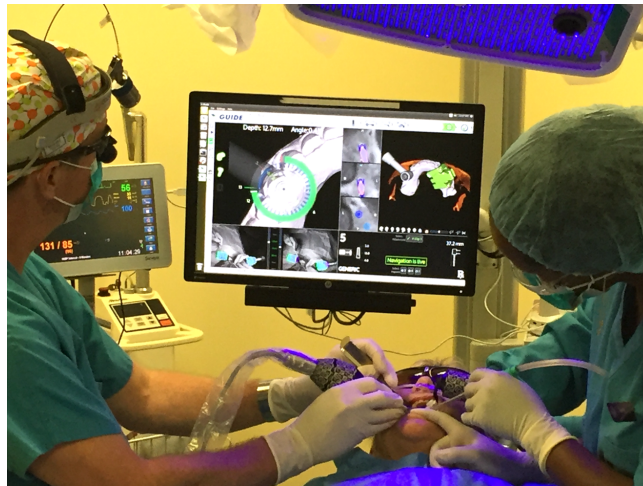


Figure 15 : Chirurgie implantaire par navigation, courtoisie du Dr. Emery (53)

Les systèmes passifs requièrent la **virtualisation de l'instrument** opératoire (contre-angle d'implantologie) ainsi que **la correspondance exacte du patient physique sur son modèle virtuel** (54). Pour cela, la chirurgie guidée par l'image est alors conditionnée par deux prérequis, à savoir une technique de suivi en temps réel des marqueurs (fixés sur le contre-angle et sur l'arcade du patient) et une technique d'enregistrement de la correspondance des marqueurs.

2.3.1.1 Techniques de localisation spatiale

La localisation spatiale ou « tracking » est l'élément essentiel de cette technologie. Pour permettre la localisation, plusieurs paramètres sont à prendre en compte (2) :

- Suivi du patient (site opératoire)
- Suivi de l'instrumentation
- Système de stéréovision
- Interface graphique de visualisation (Logiciel de contrôle)

Il existe plusieurs systèmes permettant la conversion de la position d'un capteur ou marqueur placé sur un instrument en coordonnées cartésiennes relatives (55).

2.3.1.1.1 Électromécanique

C'est la première technique à avoir été développée. Ce système (Figure 16) fait intervenir une structure supportant un bras articulé à plusieurs segments avec 5 ou 6 degrés de liberté. L'instrument de l'opérateur fixé au bout du bras retransmet simplement les informations spatiales. Ce suivi est le suivi haptique, c'est-à-dire qu'il se fait au travers d'un moyen physique ou mécanique.

Bien que la précision soit de l'ordre du micromètre, cette technique implique que le patient soit totalement immobile ou nécessite un second bras articulé (fixé au patient) venant encombrer le champ opératoire pour enregistrer tous les mouvements du patient.



Figure 16 : Acrobot Navigation[®],
<http://www.grasshopper-hosting.co.uk> (56)

2.3.1.1.2 Ultrasonique

Un transmetteur ultrasonique sur l'instrument produit un signal qui est capté par au moins trois microphones à distance du site opératoire. La vitesse de la propagation du son étant connue, la position de l'instrument peut être calculée par triangulation. Le problème majeur est l'imprécision pouvant atteindre plusieurs centimètres à cause de l'influence de la température, de l'hygrométrie et des interférences pouvant être provoquées par le chirurgien.

2.3.1.1.3 Électromagnétique

Plus récent, le système électromagnétique génère un champ magnétique sur les trois axes de l'espace. Un récepteur équipé d'une bobine pour chacun des axes est capable d'interpréter la position du transmetteur en fonction du voltage induit dans les bobines.

2.3.1.1.4 Optique

Contrairement aux techniques ultrasonique et électromagnétique sensibles aux interférences, c'est le système le plus abouti : il s'agit donc du système de choix utilisé en implantologie (57). Le « tracking » optique permet le suivi simultané de plusieurs pièces ; il est nécessaire pour l'intégration de la **position de l'arcade** du patient (pouvant être en mouvement) en relation avec la **position de l'instrument**. La localisation est possible par la mesure stéréoscopique consistant à se servir de la prise d'images à partir de points de vue différents. Au moins deux caméras sont nécessaires et doivent être positionnées au-dessus du champ opératoire.

Deux approches existent pour cette technique (58) :

- Le **tracking optique passif** utilise des marqueurs qui réfléchissent la lumière émise directement par le module de stéréo-caméra.
- Le **tracking optique actif** fait intervenir également des marqueurs ; ces derniers émettent cependant leur propre lumière captée ensuite par les caméras.

Le suivi actif a pour désavantage de nécessiter l'alimentation des sources lumineuses conduisant à la présence de câbles qui viennent encombrer le champ opératoire. La reconnaissance optique des marqueurs passifs nécessite, néanmoins, plus de travail informatique car les réflexions lumineuses des marqueurs ne peuvent pas être programmées. Il devient alors plus complexe de les individualiser. Le tracking optique passif est plus couramment utilisé dans le cadre de la navigation en chirurgie implantaire.

L'obstacle majeur du tracking optique reste la nécessité d'un champ de vision libre sans aucun obstacle entre les marqueurs et les caméras. Cela nécessitera une adaptation du praticien. (59)

Les marqueurs arcade et instrument (Figure 17) doivent :

- Être fixés de manière stable sur l'arcade du patient (marqueur-arcade) et sur l'instrument (marqueur-instrument)
- Être de poids léger et de taille suffisamment réduite pour ne pas gêner l'opérateur
- Posséder assez de points de repère optiques pour que le suivi soit de qualité

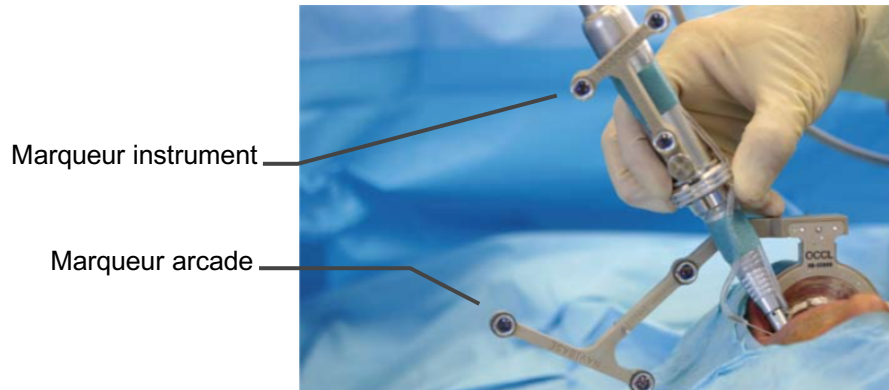


Figure 17 : Marqueurs actifs instrument et arcade du système *Robodent*[®], Armand S. (60)

2.3.1.2 Volume de suivi

Le volume de suivi chirurgical correspond au champ de vision des stéréo-caméras (Figure 18). Plus ce volume sera grand alors moins le système sera précis. Cependant, ce volume doit être suffisamment grand pour suivre les deux marqueurs : instrument et arcade. Ce volume sera superposé à un système de coordonnées cartésiennes.

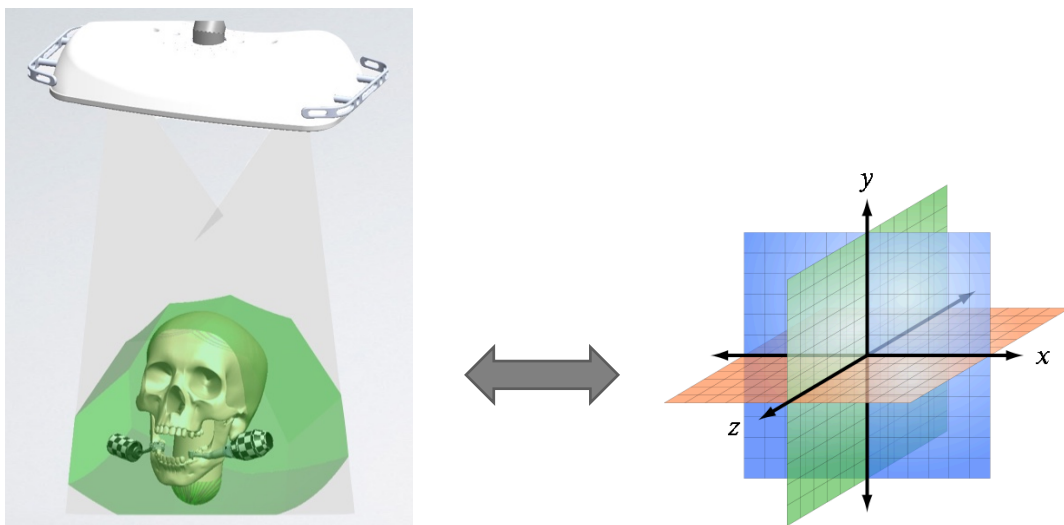


Figure 18 : Superposition du volume de suivi chirurgical matérialisé en vert avec le système de coordonnées, courtoisie du Dr. Emery (61)

La disposition classique d'un système de navigation en implantologie peut se schématiser ainsi :

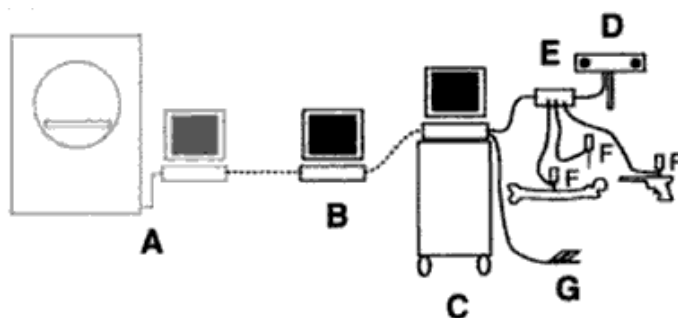


Figure 19 : Configuration classique d'un système de chirurgie guidée par l'image préopératoire, Digioia A. (59)

A : Système d'imagerie CBCT

B : Planification assistée par ordinateur

C : Kart du système de navigation

D : Module de stéréovision

E : Contrôleur

F : Marqueurs fixés sur le patient

(marqueur-arcade) et sur l'instrument

(marqueur-instrument)

G : Pédale de pied

2.3.1.3 Enregistrement par repère physique

L'enregistrement permet la création d'un algorithme ayant pour fonction d'attribuer à chaque coordonnée spatiale physique une coordonnée spatiale virtuelle et vice versa. (62)

Nous pouvons catégoriser les méthodes d'enregistrement en deux types distincts :

- L'enregistrement à l'aide d'un repère :

Ce type d'enregistrement nécessite un repère physique visible sur les images préopératoires et facilement détectable lors des examens d'imagerie. Ainsi, le repère peut s'apparenter à toute une variété de systèmes. De manière non exhaustive, nous pourrions trouver des vis transcorticales placées sur le procès alvéolaire, une gouttière ou une clé occlusale comportant un ou plusieurs éléments radio-opaques et adaptée sur l'arcade dentaire. D'autres repères correspondent à des objets collés directement sur la peau.

- L'enregistrement sans repère :

De manière opposée, dans le cadre d'un enregistrement sans repère, c'est l'anatomie craniofaciale propre au patient qui permettra de faire le lien entre les données virtuelles et physiques. Classiquement, on cherchera à faire correspondre des protubérances osseuses comme par exemple l'épine nasale antérieure. Une autre approche consiste à « scanner » par un laser l'ensemble de la surface faciale du patient. Une corrélation est ensuite effectuée entre des points de référence sur la peau du patient et sur les tissus mous de l'imagerie.

Toutes ces techniques d'enregistrement sont plus ou moins sujettes à certaines approximations. Aussi, il faut savoir évaluer le degré de précision à obtenir pour choisir la méthode d'enregistrement la plus adaptée. Dans le **cadre de l'implantologie**, il est recommandé d'avoir recours à l'enregistrement par repère physique. Une **gouttière ou une clé occlusale** (Figure 20) est suffisante pour un système de navigation. La précision peut être augmentée en utilisant, en plus, des vis d'ostéosynthèse. (63)



Figure 20 : Repère radio-opaque de référence du système Navident® correspondant à une gouttière en Stent's® avec son élément radio-opaque, Burgess D. (64)

Pour résumer, avant de commencer l'acte opératoire, la correspondance entre le patient et son modèle 3D se fait à l'aide d'un repère radio-opaque de référence (gouttière occlusale). Ce repère a été positionné sur l'arcade du patient de manière fixe **pendant l'examen CBCT** pré-opératoire. Ayant une position reproductible et unique, il sera localisé **pendant l'opération** par stéréoscopie grâce au marqueur-arcade (extra-oral) qui sera adapté dessus. De cette façon, si le patient n'est pas immobile, cela n'aura pas d'impact puisque son arcade est localisée et le modèle virtuel mis à jour en temps réel. La littérature ne fait pas mention de temps de latence

dans le cadre de suivi par stéréovision. L'enregistrement par appariement de points est la technique d'enregistrement standard en navigation implantaire. (50)

Le volume d'acquisition correspond aux dimensions du champ du CBCT. Ce volume sera également superposé à un système de coordonnées (Figure 21) similaire à celui du volume de suivi. Il doit pouvoir contenir le site implantaire et le repère de référence à distance. Ainsi, un champ large de préférence de type 8 x 15 cm doit être utilisé.

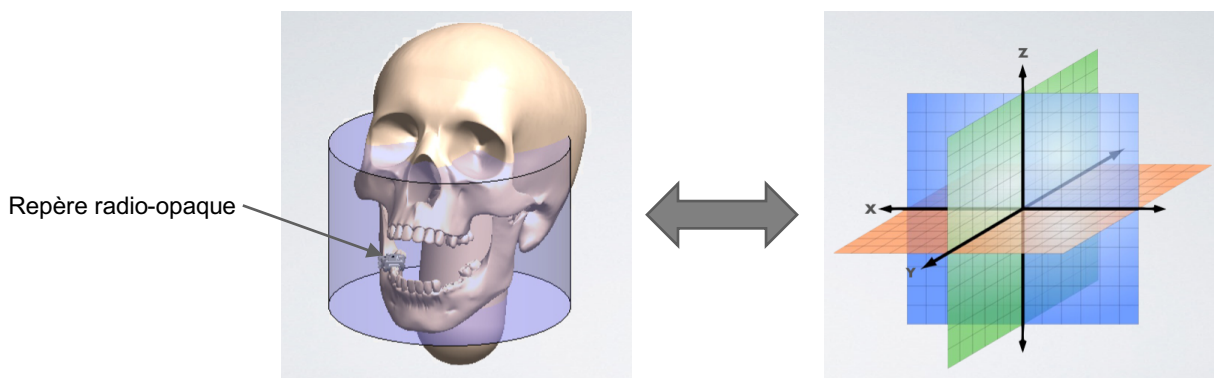


Figure 21 : Superposition du volume d'acquisition avec le système de coordonnées, courtoisie du Dr. Emery (61)

Le repère radio-opaque de référence devra respecter plusieurs prérequis :

- Avoir une position fixe et reproductible sur les dents ou sur la crête alvéolaire si la patient est édenté
- Être proche du site implantaire
- Être capable de maintenir le marqueur-arcade extra-oral
- Être de fabrication simple

Les volumes (de suivi et d'acquisition) une fois définis, possèdent un système de coordonnées spatiales commun. Ainsi, lors de l'étape d'enregistrement, il est possible de faire correspondre les coordonnées du volume d'acquisition avec les coordonnées du volume de suivi.

Cette correspondance permet l'alignement du champ opératoire sur la matrice tridimensionnelle du CBCT visualisée à l'écran.

2.3.1.4 Calibrage de l'instrument à suivre

Le calibrage a pour but principal de prendre en compte la forme et les dimensions de l'instrument utilisé pour la navigation.

Concrètement, pour calibrer l'instrument, il faut positionner son extrémité sur un point donné dont les coordonnées spatiales sont connues (Figure 22). Ainsi, les dimensions de l'instrument seront prises en compte lors du suivi. En respectant certains alignements, dont les angulations sont connues, le système sera également capable d'afficher son orientation en plus de sa position. (55)

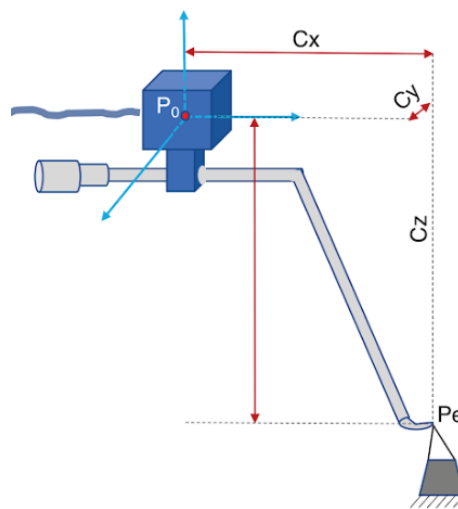


Figure 22 : Calibrage d'un instrument de navigation, Lombard B. (55)

P_0 : Coordonnées du marqueur-instrument fixé sur l'instrument et localisé par les stéréo-caméras

P_e : Coordonnées du point de calibrage prédéfini (connues par le système)

2.3.2 Différents systèmes sur le marché

Depuis le début des années 2000, de nombreux systèmes ont été développés. Ils suivent tous le même concept mais chacun d'eux diffère quelque peu par sa technologie de marqueur, la configuration du suivi, la procédure d'enregistrement et l'interface de planification et d'utilisation.

Les systèmes les plus connus et utilisés à ce jour sont (54)(62) :

- *Image Guided Implantology IGI®* de *Image Navigation* (Israël)
- *RoboDent®* de *BrainLAB* (Allemagne)
- *Stealth Station Treon®* de *Medtronic* (Etats-Unis)
- *X-Guide®* de *X-Nav Technologies* (Etats-Unis)
- *Vector Vision®* de *BrainLab* (Allemagne)
- *Navident®* de *ClaroNav* (Canada)

L'ensemble des notions fondamentales traitées dans cette partie 2.3, portant sur la navigation en implantologie, sera concrètement illustré dans la grande partie 3. Pour cela, le système X-Guide de la société X-Nav Technologies a été retenu. En effet, sorti en 2015, ce nouveau système propose des solutions innovantes en plus d'être repris dans de multiples études scientifiques récentes. De cette façon, l'application du X-guide sera présentée au travers des différents temps opératoires (préopératoire, peropératoire et post-opératoire).

2.4 Système actif avec l'assistance robotisée

Récemment, en septembre 2017 à l'Hôpital militaire de Xi'an, a eu lieu la première chirurgie implantaire exécutée par un robot autonome (65). Ce système est encore en cours de développement et de recherche dans le domaine de l'implantologie orale sous la direction du Pr. Zhao Yimin (Figure 23).

N'ayant pas suffisamment d'informations, il n'est pas raisonnable d'envisager l'étude de ce système dans cette présente thèse notamment dans la dernière partie de discussion. En effet, outre des présentations succinctes, il n'y a pour le moment encore aucune publication scientifique expliquant de manière précise l'assistance active robotisée en implantologie orale. Cependant, le Pr. Zhao a confirmé par mail que son équipe a utilisé ce système sur une dizaine de cas et que des publications sortiront prochainement.

2.4.1 Principe de fonctionnement

Pour rappel, dans le cadre d'une assistance robotisée, le chirurgien n'intervient plus directement dans la cavité buccale du patient. Il surveille le robot réalisant l'acte opératoire programmé. Équipé d'un système intégré de localisation et de suivi similaire au système passif cité précédemment, ce système actif exécute la procédure de forage grâce à un bras articulé. Le chirurgien surveille le bon déroulement de l'opération. Il intervient notamment pour l'anesthésie et les changements de forets.

2.4.2 Indication

La mise au point d'un tel type de robot dans le domaine de l'implantologie permettrait, selon les auteurs, de réduire les erreurs chirurgicales imputables à l'homme et de remédier à la pénurie de dentistes qualifiés en implantologie en Chine (66). Il est raisonnable de s'interroger sur la démocratisation d'un tel système. En effet, on peut supposer que le coût élevé d'une intervention à l'aide d'un système actif serait un véritable frein à son accessibilité pour une partie de la population. De plus, il ne faut pas oublier que l'acte chirurgical en implantologie n'est pas forcément la partie la plus complexe. En effet, le robot opérateur ne permettrait pas, à lui seul, de conduire correctement la démarche de réflexion sur la phase de planification et du plan de traitement implantaire. La nécessité d'avoir des implantologues qualifiés est alors primordiale. De cette façon, il est difficile de retenir l'argument sur l'intention d'endiguer la pénurie de spécialistes.



Figure 23 : Première chirurgie implantaire effectuée par un système robotique autonome, <http://wemedia.ifeng.com> (67)

3 Étude de la chirurgie par navigation au travers du système X-Guide[®]

Le système X-Guide (Figure 24) conçu par la société X-Nav Technologies est apparu en 2015. Défini comme un appareil de **navigation dynamique à tracking optique passif**, il offre au praticien la possibilité d'exécuter la planification en plus de la chirurgie sur le même outil de travail.



Figure 24 : Système de navigation X-guide[®], Tolstunov L. (68)

Ce système dispose de **marqueurs optiques passifs** bien spécifiques. Ce sont des cylindres en céramique présentant un code barre à 2 dimensions de type QR-code, sur l'ensemble de la surface (Figure 25). L'instrument et l'arcade possèdent leur propre cylindre fixé solidement et immobile. La forme cylindrique permet un suivi dans les 3 dimensions de l'espace.

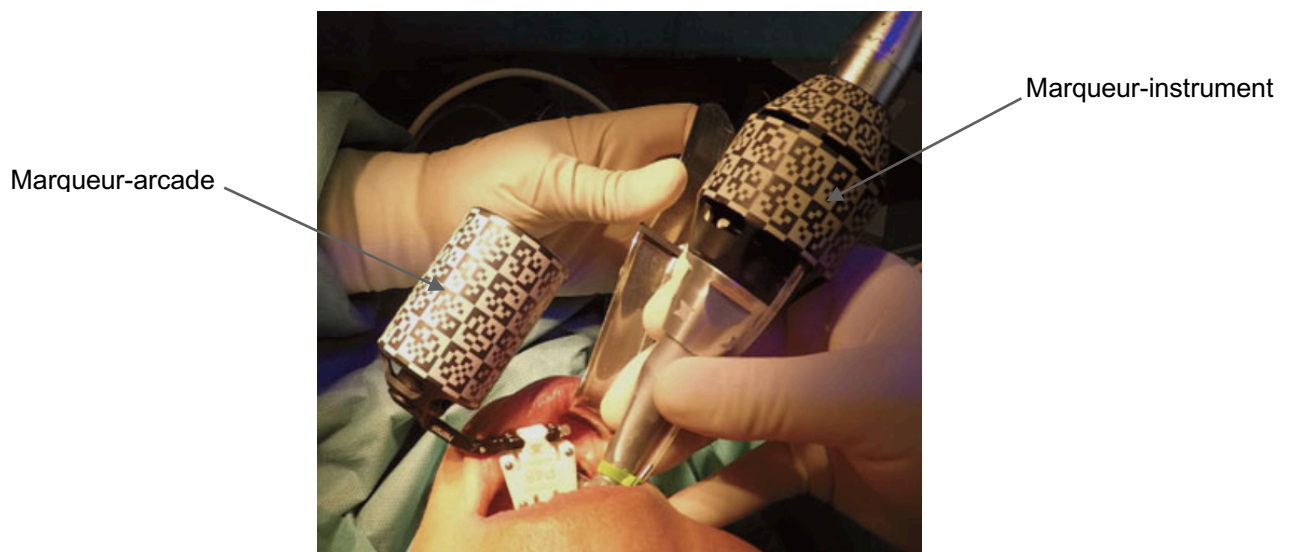


Figure 25 : Marqueur arcade (à gauche) et marqueur instrument (à droite), Legac O. (69)

Au-dessus du champ opératoire se trouvent les stéréo-caméras et le scialytique. Ce dernier diffuse une lumière bleue permettant d'accentuer la réflexion des marqueurs passifs qui sera captée par les caméras (Figure 26).

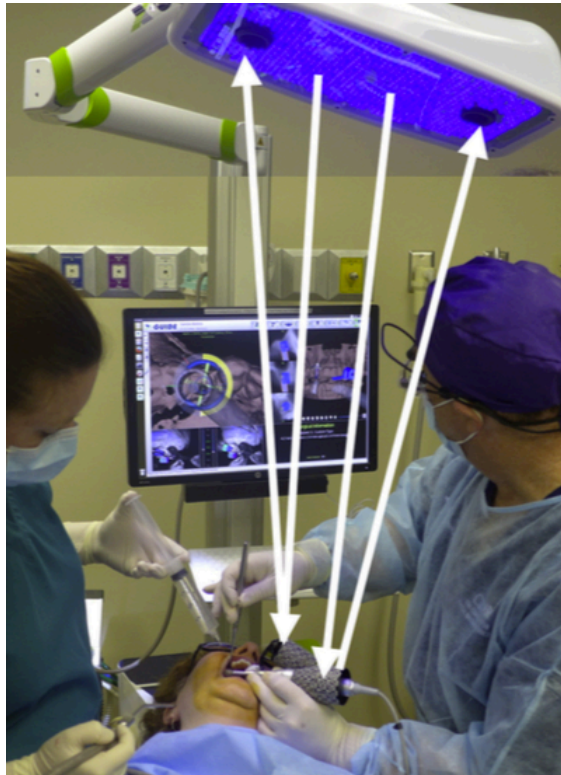


Figure 26 : Réflexion de la lumière bleue vers les stéréo-caméras à partir des marqueurs, Block M. (50)

Le praticien peut alors positionner l'implant de manière précise grâce au suivi de la position, de l'angle et de la profondeur diffusés en temps réel sur l'écran de contrôle.

3.1 Étape préopératoire

3.1.1 Examen clinique

Au cours du premier entretien, comme dans le cadre d'une chirurgie implantaire classique, il importe de réaliser un premier examen clinique complet du patient après avoir fait son anamnèse. Cette consultation permettra de savoir si le patient peut être candidat pour une chirurgie implantaire et, à l'aide des examens radiographiques, le praticien s'orientera vers une technique adaptée. Le choix déterminant la technique de chirurgie guidée, la plus adaptée en fonction du cas clinique, sera présenté dans la dernière partie au travers d'un organigramme.

3.1.2 Acquisition des données radiographiques et préopératoires

Dès lors que le praticien utilise la chirurgie assistée par ordinateur, l'examen CBCT est indispensable en plus de la radio panoramique pour la planification.

3.1.2.1 Positionnement du repère radio-opaque de référence

Dans le cadre d'une chirurgie par navigation, le CBCT préopératoire sera utilisé pour le suivi en temps réel puisqu'il représentera le patient virtuel. Pour cela, le patient devra réaliser l'examen avec un repère radio opaque en bouche **placé sur la même arcade que l'implant planifié** mais du côté opposé pour ne pas gêner le site du forage.

➤ Patient denté :

La technologie X-nav® a pour cela mis au point le *X-Clip* (Figure 27). Ce dispositif assimilable à un porte empreinte sectoriel de type mini-tray contient 3 billes métalliques (radio-opaques) et présente une encoche en vestibulaire.

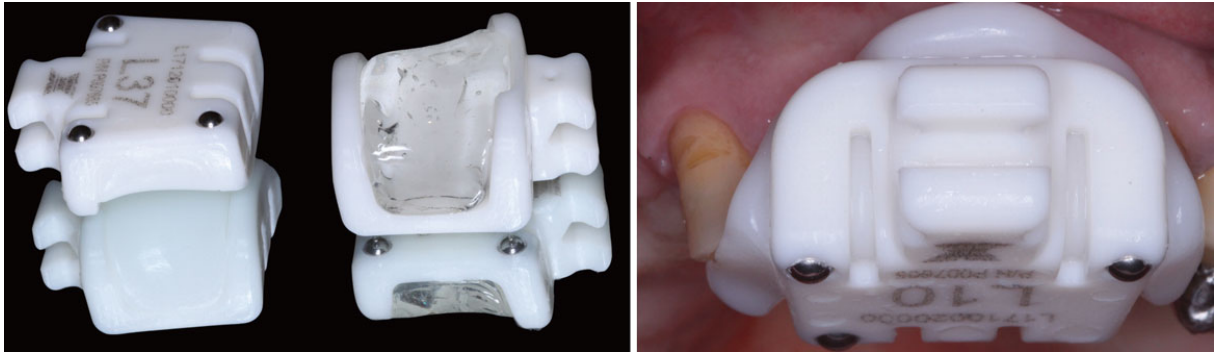


Figure 27 : X-Clip avec le matériau thermoformable à gauche et placé sur l'arcade à droite, Legac O. (69)

Pour un positionnement correct du *X-Clip*, il convient de suivre ces différentes étapes :

- Choix réalisable de l'**emplacement** (3 dents contiguës non mobiles, pas de fil orthodontique ou de bracket sur les dents supports ...).
- **Isolation** des dents reconstituées en résine/composite.
- Mise en place d'une **résine** thermoformable en phase plastique (transparente) dans l'intrados en veillant à ne pas en mettre sur l'encoche vestibulaire.
- **Maintient en place** sur les dents supports jusqu'à durcissement du matériau. En phase plastique, la résine est transparente. Elle devient blanche opaque une fois durcie. La solidification se termine ensuite dans de l'eau froide.
- Remise en place sur les dents supports. La **reproductibilité** du placement est validée par un claquement.
- Si un guide radiologique doit être utilisé, il faudra veiller à couper le guide au niveau du *X-Clip*.

➤ Cas particulier du patient édenté :

Dans le cas où le patient est édenté, il n'est pas possible de placer le repère *X-Clip* en bouche. Ainsi, pour permettre l'acquisition du CBCT avec un repère radio-opaque, le chirurgien vient placer 5 vis d'ostéosynthèse (1,5 x 4 mm) le long de la face vestibulaire du procès alvéolaire de l'arcade concernée par la chirurgie (Figure 28). Une simple incision suffit pour placer chaque vis qui peut ensuite rester en situation sous muqueuse jusqu'à la chirurgie. Cet ensemble constitue le repère «radio opaque du patient édenté ».

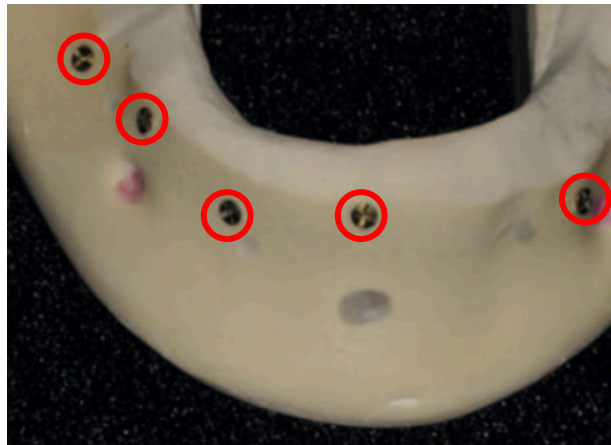


Figure 28 : Vis d'ostéosynthèse placées le long d'un modèle d'arcade mandibulaire édentée, Emery R. (70)

Le patient, denté ou non, est maintenant prêt à passer son examen tridimensionnel.

3.1.3 Planification informatique

3.1.3.1.1 Étapes informatiques

- Importation des données tridimensionnelles du CBCT

La planification se fait directement sur le logiciel de navigation. Dans un premier temps, le praticien importe les données DICOM (Figure 29). Il peut marquer le canal alvéolaire inférieur, visualiser les différentes coupes anatomiques, etc.

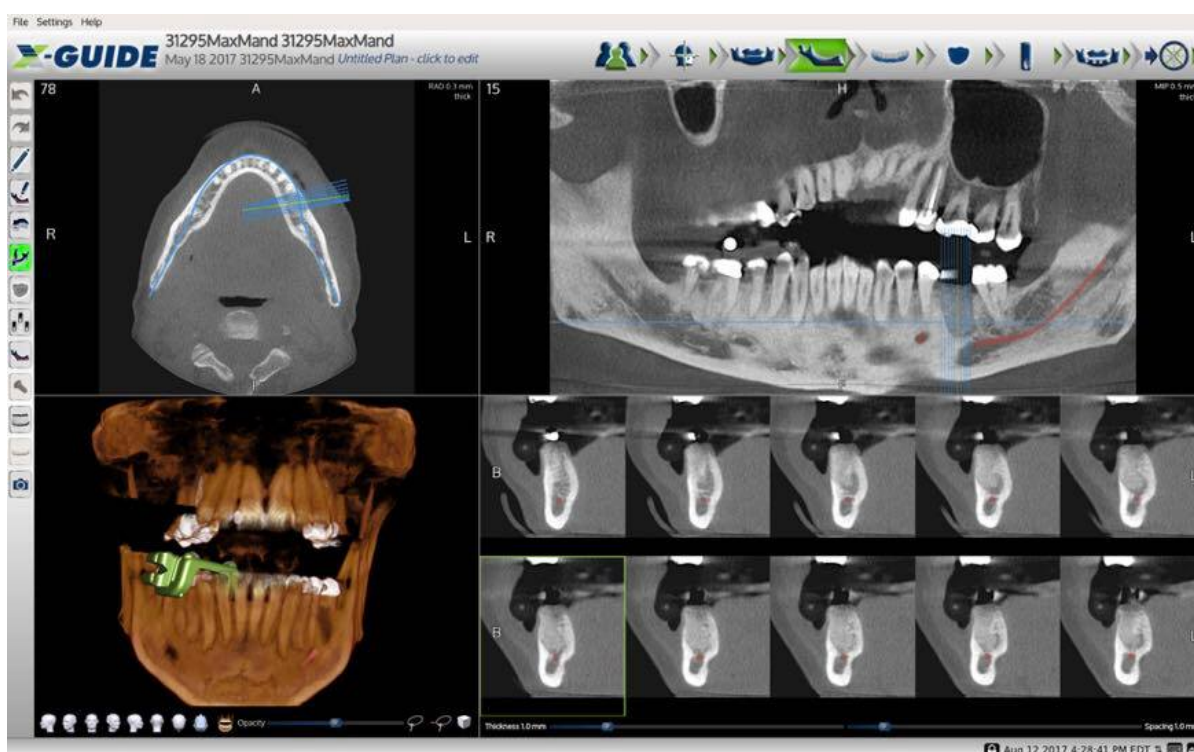


Figure 29 : Importation des données DICOM (Courtoisie du Dr. Emery)

- Superposition des données CBCT avec un fichier STL

L'examen 3D transmet toutes les informations nécessaires concernant les tissus durs. Pour être capable de planifier de manière optimale la position de l'implant, il faut également disposer des caractéristiques des tissus mous et aussi de la situation des dents antagonistes. Pour cela, l'opérateur doit superposer le fichier DICOM avec un fichier STL correspondant à l'empreinte numérique des arcades du patient (avec ou sans le projet prothétique supra-implantaire). Cette empreinte numérique s'obtient soit en scannant le modèle en plâtre, soit par une empreinte numérique optique intra-orale.

Le « matching » (Figure 30) entre les fichiers DICOM et STL se fera en sélectionnant au minimum 3 points communs entre eux (pointe cuspidienne, sillon occlusal, etc.). Dans l'absolu, cette étape de « matching » n'est pas indispensable à la réalisation de la chirurgie guidée. Mais dans le sens où la communauté scientifique admet que l'implantologie doit être guidée par la prothèse, il est impensable de s'en passer.

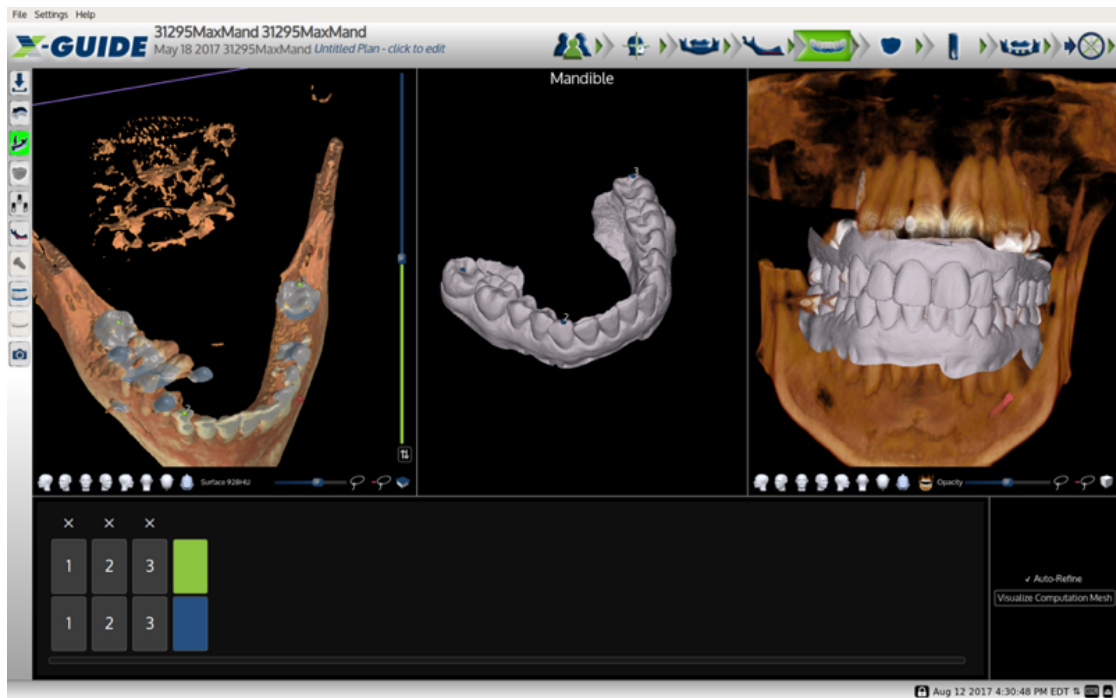


Figure 30 : « Matching » des fichiers DICOM et STL (Courtoisie du Dr. Emery)

- Prévisualisation de l'implant et du projet prothétique

Enfin, comme sur la plupart des logiciels de planification, le praticien réalise d'abord le projet prothétique qui sera (69) :

- Soit **réalisé virtuellement** (directement sur le système X-guide) avec les modèles en occlusion si le fichier STL présente simplement l'édentement.
- Soit **transféré à partir d'un fichier STL** possédant déjà le projet prothétique.

En effet, sur le logiciel, la prothèse peut :

- avoir été réalisée virtuellement sur un autre logiciel pour obtenir un fichier STL avec le projet prothétique,
- ou être la réplique d'une prothèse provisoire réelle, essayée et ajustée dans la bouche du patient.

Dans un second temps, l'implant prévu pour la chirurgie sera positionné virtuellement en fonction de ce projet prothétique.

Cette fonction principale a pour but d'afficher l'association des **éléments anatomiques** du patient avec le **projet implantaire** et le **projet prothétique supra-implantaire** (Figure 31).

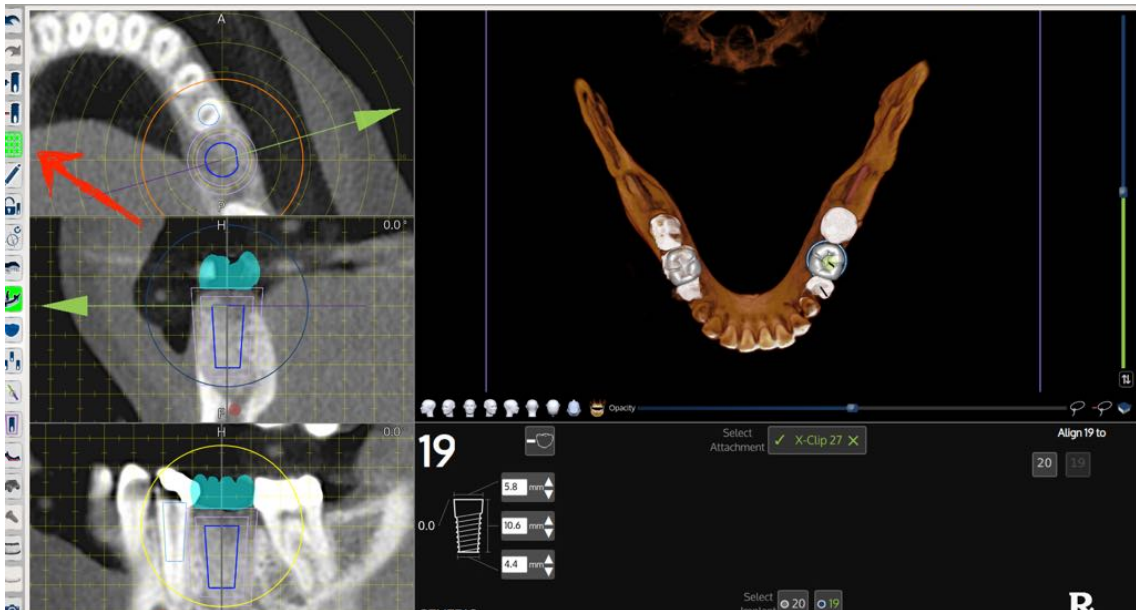


Figure 31 : Planification du projet implantaire et prothétique (Courtoisie du Dr. Emery)

- Cas particulier du patient édenté :

Pour le patient édenté, les vis d'ostéosynthèse doivent être localisées sur le logiciel avant de planifier l'opération. Pour cela, le chirurgien pointe, sur le logiciel, la tête et la pointe de chacune des vis. Ainsi, le système est capable d'orienter le repère radio-opaque sur son système tridimensionnel.

NB : Sur une arcade dentée, avec le repère X-Clip, l'agencement des 3 billes métalliques est déjà connu par le système, ce qui permet d'orienter automatiquement l'arcade.

Bien souvent, le patient édenté possède déjà sa prothèse amovible totale avant d'envisager la pose d'implants. Dans ce cas, si la prothèse est correctement adaptée en bouche, on procédera de préférence, à la technique appelée « **Dual Scan** » ou « **Double Scan** ». Permettant d'éviter l'utilisation d'une réplique de la prothèse comportant du sulfate de baryum, cette technique est aujourd'hui reconnue comme la plus simple et la moins onéreuse dans le domaine de l'implantologie guidée (71). Le scan de la prothèse seule permet de numériser précisément la prothèse, qui en bouche, n'est pas suffisamment visible radiologiquement.

Ainsi, munie de marqueurs radio-opaques (Figure 32), la prothèse doit être scannée d'abord seule lors d'un premier examen CBCT puis ensuite en bouche lors d'un second examen tridimensionnel. Les deux fichiers DICOM obtenus seront ensuite « matchés » sur le logiciel grâce aux marqueurs radio-opaques. De cette façon, le praticien sera capable d'effectuer la planification implantaire en fonction du positionnement thérapeutique de la prothèse amovible complète correspondant au projet prothétique.

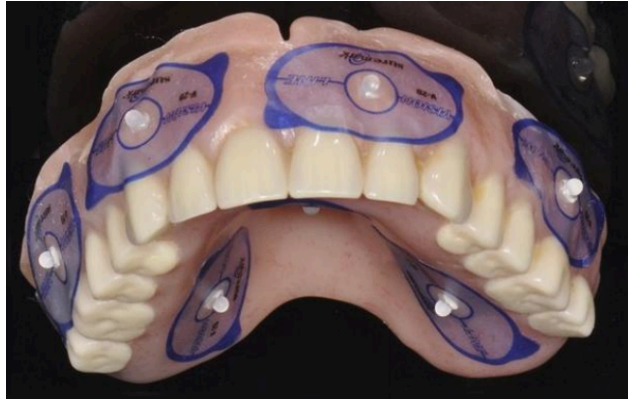


Figure 32 : Prothèse amovible totale maxillaire avec des marqueurs radio-opaques adhésifs et non métalliques, <http://www.oralartsdental.com> (72)

3.2 Étape peropératoire : transfert de la planification au site

3.2.1 Calibrage du système avant le début de l'intervention

Juste avant de commencer la chirurgie, le praticien doit procéder au calibrage des instruments grâce aux marqueurs qui seront fixés sur le contre angle (marqueur-instrument) (Figures 33 et 34) et sur le repère radio-opaque (marqueur-arcade) (Figure 36). Tout doit se dérouler à bonne distance, à la lumière bleue du scialytique (60 à 80 cm).

- Calibrage du marqueur-instrument :

Pour calibrer le contre-angle opératoire, deux étalonnages sont nécessaires. Il s'agit de l'étalonnage du corps et de l'étalonnage du mandrin. L'étalonnage du corps détermine la relation géométrique entre la partie cylindrique et la partie conique du marqueur-instrument. L'étalonnage du mandrin (à l'aide d'un disque d'insert) détermine la relation géométrique entre le marqueur-instrument et la pointe du contre-angle.

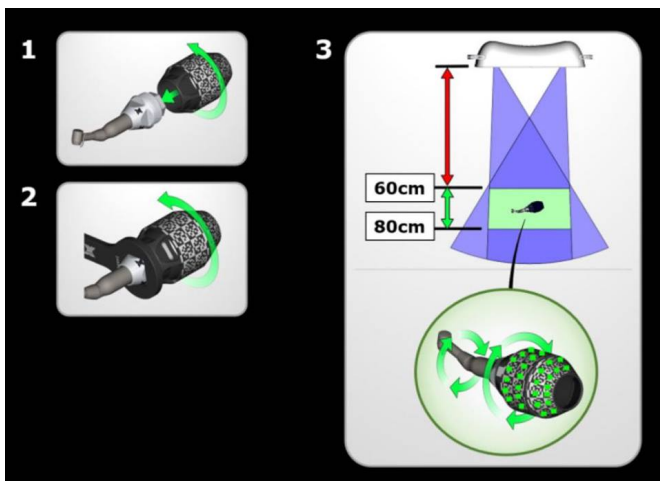


Figure 33 : Calibrage du corps de l'instrument (Courtoisie du Dr. Emery)

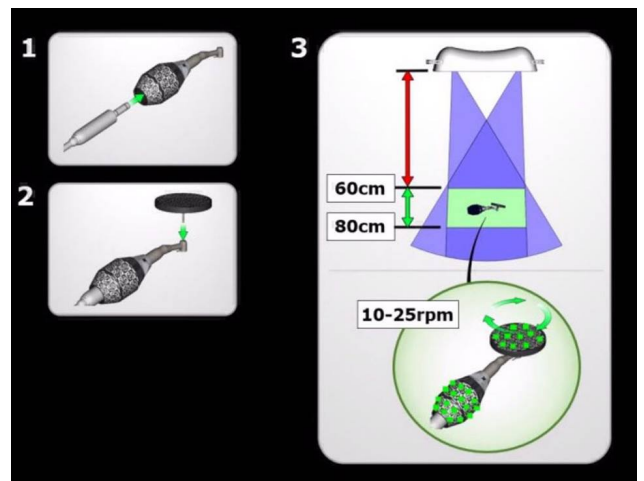


Figure 34 : Calibrage du mandrin avec le disque d'insert (Courtoisie du Dr. Emery)

L'instrument est ainsi étalonné sur les 6 degrés de liberté (Figure 35).

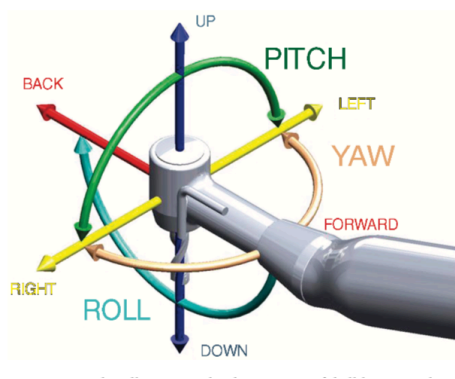


Figure 35 : Axes et mouvements suivis par le système de navigation, Tolstunov L. (68)

<u>Axes</u>	<u>Mouvements</u>
Up/Down = Axial	Pitch = Tangage
Back/Forward = Sagittal	Roll = Roulis
Right/Left = Transversal	Yaw = Rotation

- Calibrage du marqueur-arcade :

Le calibrage du marqueur-arcade détermine la relation géométrique entre le marqueur et le repère radio-opaque de référence. Il assure la coordination de l'anatomie du patient entre l'arcade réelle et son modèle tridimensionnel.

Pour calibrer le marqueur-arcade, il faut d'abord visser le marqueur-arcade à l'extrémité de son manche (Figure 36 - 1). Ensuite, le repère radio-opaque de référence (X-Clip) doit être fixé à l'autre extrémité du manche (Figure 36 - 2) avant de le visser fermement l'attache sur le X-Clip avec le tournevis du système (Figure 36 - 3). Enfin, le dispositif assemblé doit être présenté au scialytique selon plusieurs inclinaisons pendant environ 50 secondes (Figure 36 - 4).

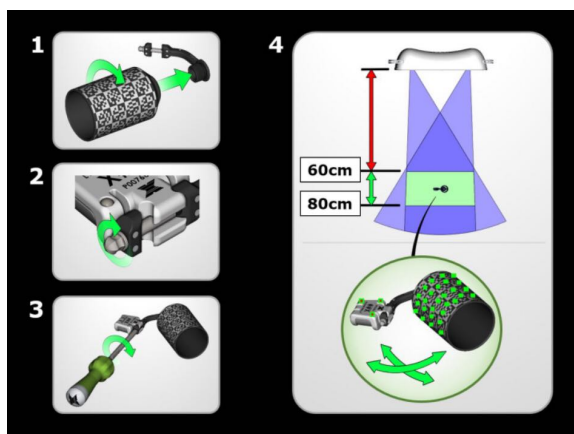


Figure 36 : Calibrage du marqueur-arcade vissé sur le X-Clip (Courtoisie du Dr. Emery)

- Validation du calibrage :

Le calibrage doit être validé avant de commencer l'opération. Pour cela, le patient est installé au fauteuil sous le scialytique de lumière bleue avec le repère radio-opaque (équipé de son marqueur) repositionné de manière exacte en bouche. Le foret du contre-angle vient toucher le centre d'une plaque en céramique (*Go-Plate*[®]) (Figure 37 – 1) puis chacune des billes métalliques du repère radio-opaque (Figure 37 – 2). La *Go-Plate*[®] permet au système de déterminer la longueur des différents forets ou implants qui seront utilisés. Le praticien passera à la chirurgie si la précision est inférieure à 0,2mm (Figure 37 - 3) .

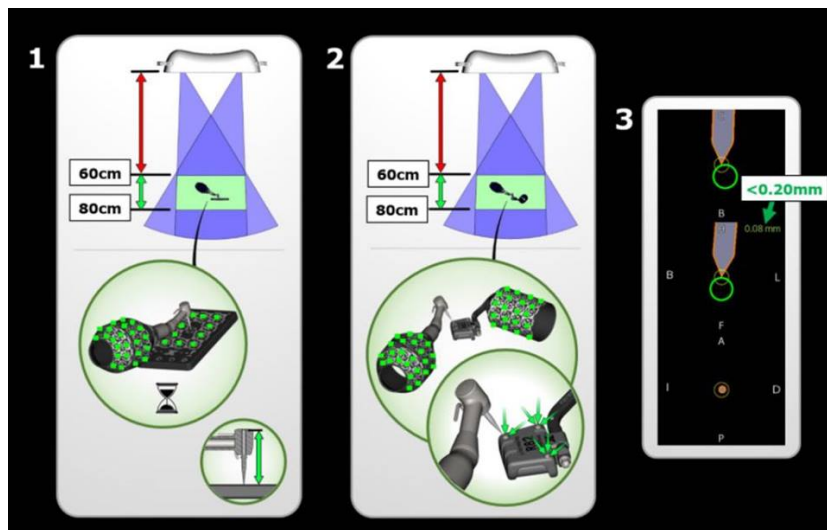


Figure 37 : Validation du calibrage (Courtoisie du Dr. Emery)

Enfin, l'opérateur vérifie l'information présentée à l'écran en touchant un élément anatomique précis (bord libre, etc.). Cela valide la corrélation entre les modèles réel et virtuel permettant au praticien de pouvoir se fier au système.

Pendant la chirurgie, l'opérateur doit cependant refaire une validation du calibrage de foret ou de l'implant, à chaque changement ou étape, avec la *GoPlate*[®] (Figure 37 - 1). Cette manœuvre, d'une durée de quelques secondes, permet au système de mettre à jour la longueur du foret ou de l'implant utilisé.

- Cas particulier : Calibrage chez le patient édenté

Le calibrage du marqueur, placé sur le contre-angle opératoire, reste identique. Cependant, le repère radio-opaque du patient édenté (ensemble des vis d'ostéosynthèse) ne permet pas de fixer le marqueur-arcade contrairement au *X-Clip*. Il faut un dispositif supplémentaire appelé *E-Clip*. Similaire à une plaque d'ostéosynthèse, il possède l'attache permettant la fixation du marqueur-arcade.

Pour positionner le *E-Clip*, le chirurgien expose la partie vestibulaire du procès alvéolaire de l'arcade **concernée par la chirurgie et comportant les 5 vis d'ostéosynthèse**, à l'aide d'une incision sous-périostée. Ainsi, le marqueur-arcade est monté sur le *E-Clip* lui-même vissé, à l'aide de vis transcorticales, à proximité des sites implantaires (Figure 38).

A cet instant, toujours sous la lumière bleue, le foret doit être mis en contact avec le centre de la *Go-Plate* avant de venir toucher les têtes des 5 vis d'ostéosynthèse dans un certain ordre. Cela permet de géo-localiser le marqueur-arcade monté sur le *E-Clip* en fonction de l'ensemble des vis d'ostéosynthèse constituant le repère radio-opaque de référence. L'appareil établit alors le lien entre le système de coordonnées du CBCT avec le système de coordonnées du volume de suivi chirurgical. Les fonctions de suivi sont maintenant identiques à celles du patient denté.

Les 5 vis d'ostéosynthèse peuvent être retirées une fois que les implants sont posés ou juste après le calibrage si elles interfèrent avec la pose d'un implant.

Pour éviter toute confusion, l'attache E-Clip ne constitue en rien le repère radio-opaque de référence puisque le patient n'a pas passé l'examen CBCT pré-opératoire avec, et elle ne comporte pas d'indice de positionnement dans l'espace (3 billes métalliques du X-Clip pour le patient denté). Le marqueur-arcade attaché dessus sera géo-localisé en fonction de sa position relative par rapport aux 5 vis d'ostéosynthèse (vissées sur la même arcade) dont le positionnement virtuel et réel est connu. C'est toujours le foret de l'instrument équipé de son marqueur-instrument et préalablement calibré qui permet de faire le lien.

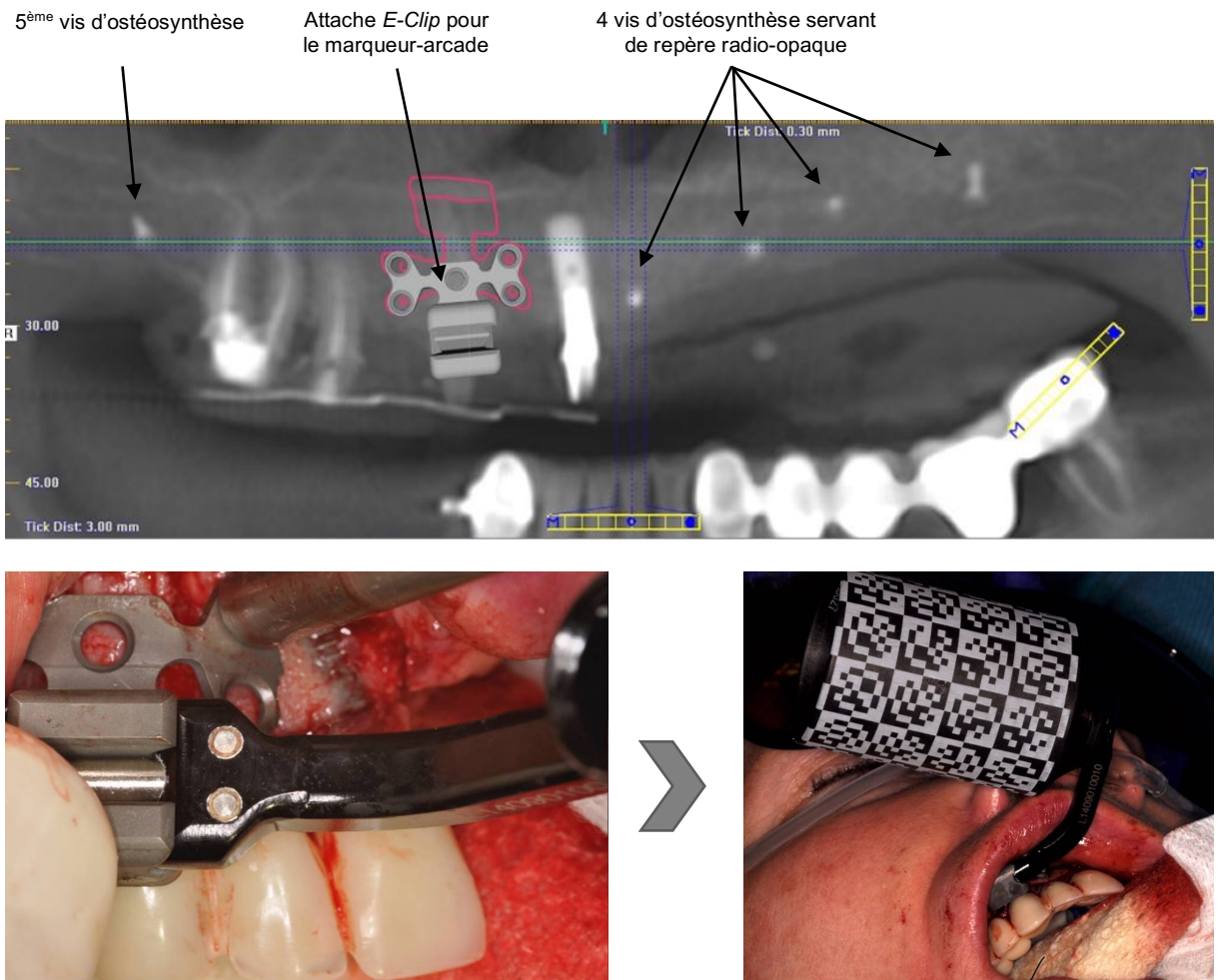


Figure 38 : Vissage du E-Clip sur le procès maxillaire avec le marqueur-arcade monté (Courtoisie du Dr. Emery)

3.2.2 Séquence opératoire de suivi dynamique

A ce stade, l'écran de navigation présente au praticien toutes les informations nécessaires pour réaliser la séquence de forage (Figure 39)

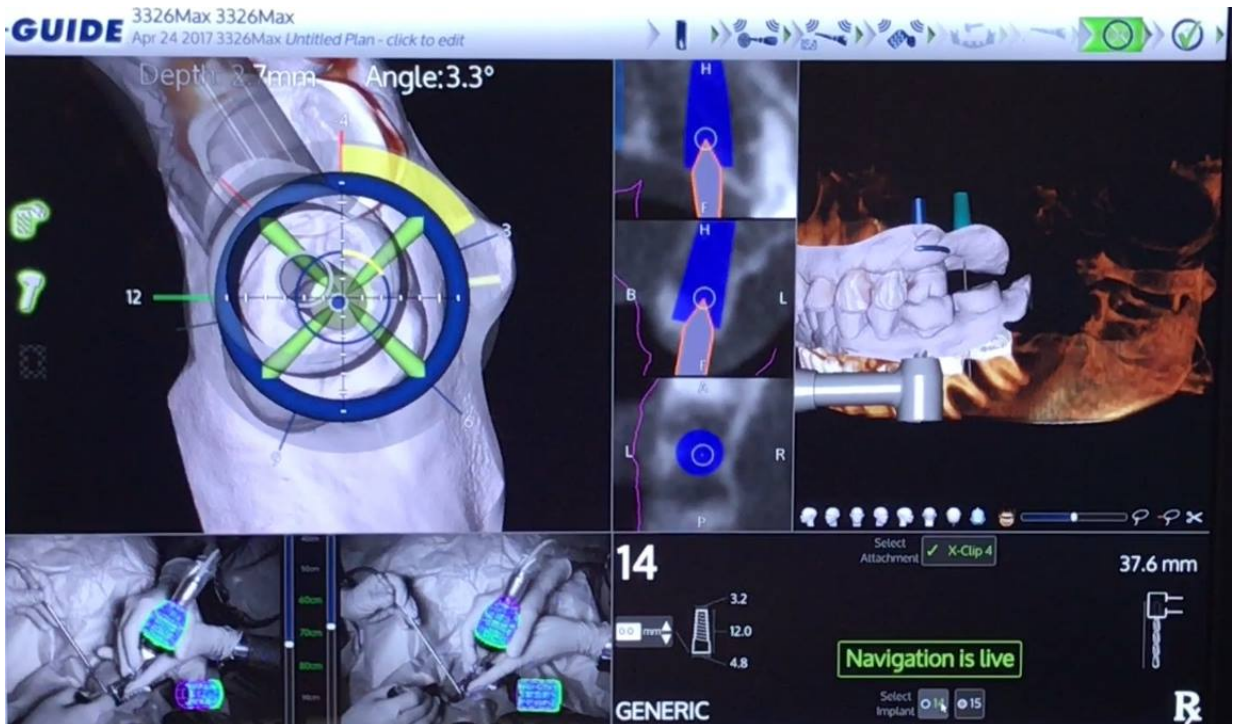


Figure 39 : Écran de navigation au début de la séquence de forage (Courtoisie du Dr. Emery)

L'image est séparée en 4 présentant :

- En haut à gauche : le contre-angle opératoire au niveau du site implantaire en vue de dessus avec une cible permettant de guider le praticien sur l'ensemble du forage.
- En haut à droite : la superposition des données de la planification ainsi que la progression du foret matérialisée sur les 3 plans de l'espace.
- En bas à droite : les caractéristiques du foret en cours d'utilisation et de l'implant choisi lors de la planification.
- En bas à gauche : le retour vidéo des stéréo-caméras avec les marqueurs en surbrillance. Une échelle informe l'opérateur sur la bonne distance de la zone de travail. Cette section permet au praticien de comprendre le champ de vision des caméras sur les marqueurs afin de ne pas créer d'obstacle.

La cible en haut à gauche est la principale zone d'intérêt pour le praticien lors du guidage (Figure 40). Celle-ci transmet à la fois :

- le centre du forage représenté par un point bleu qui doit être placé au centre des 4 cônes verts.
- la profondeur du forage matérialisée par un anneau périphérique jaune devenant vert lorsque la profondeur souhaitée est atteinte.
- l'axe du forage schématisé par un tube blanc autour du centre et qui, vu de dessus, doit s'apparenter à un cercle si le praticien est dans l'axe idéal.

La profondeur et l'angulation sont également précisées en haut de l'image.

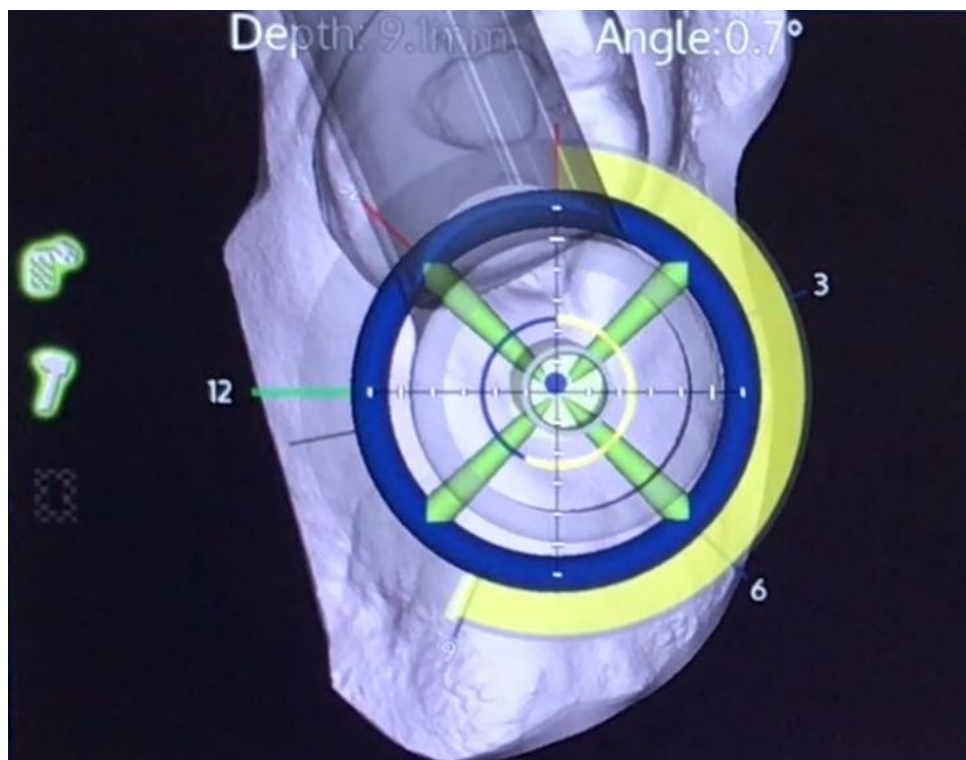


Figure 40 : Cible de guidage du système X-guide® (Courtoisie du Dr. Emery)

La séquence de forage sous navigation reste relativement identique à celle d'un forage classique, mis à part le pointage sur la Go-Plate® qui doit être effectué à chaque changement de foret sur le contre-angle. De la même manière, l'implant peut être pointé sur la plaque afin que le système puisse calibrer les dimensions dans le cadre d'une chirurgie totalement guidée. L'ensemble des éléments servant à l'étalonnage doivent donc être stériles et se trouver sur le champ opératoire (Figure 41).

3.3 Étape postopératoire

Une fois l'implant positionné, un contrôle radiographique 2D est effectué pour s'assurer du succès de l'opération. Ensuite, des rendez-vous de contrôle de cicatrisation et de suivi sont donnés au patient comme dans le cadre d'un forage classique.

4 Discussion sur l'utilisation d'un système d'assistance peropératoire

4.1 Revue de la littérature à propos des systèmes semi-actifs et passifs

4.1.1 Guide statique

4.1.1.1 Avantages

Jusqu'à présent, la littérature attribue aux guides statiques plusieurs bénéfices, à savoir principalement :

Gain de précision :

Pour analyser la précision et l'exactitude d'un système, la communauté scientifique compare la situation de l'implant virtuel positionné sur le logiciel de planification avec sa situation réelle en bouche à l'aide d'un examen tridimensionnel (scanner ou CBCT) postopératoire (73). Différentes mesures sont prises en compte afin d'évaluer la précision entre l'implant positionné et l'implant planifié (Figure 43) :

- La déviation du centre de la plateforme de l'implant
- La déviation de l'apex de l'implant
- La déviation angulaire de l'axe implantaire
- La différence de profondeur

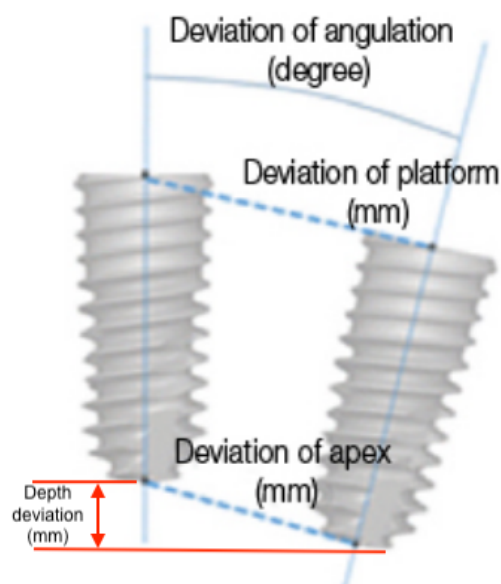


Figure 43 : Critères de comparaison pour évaluer la précision, Kang B. (73)

Depuis l'apparition des guides statiques (limitants) conçus à partir des données de la planification implantaire et réalisés par CFAO, la précision du positionnement de l'implant a augmenté. En effet, selon l'étude de *Farley et al*, les guides limitants de CAO (Chirurgie Assistée par Ordinateur) permettent un positionnement de l'implant plus fidèle à la planification par rapport aux guides conventionnels dits non limitants. (74)

Vercruyssen et al démontrent que les guides statiques ont une précision opératoire bien supérieure par rapport au positionnement à main levée (Tableau 1) (75) :

	Déviatiion du centre de la plateforme (écart type)	Déviatiion de l'apex (écart type)	Déviatiion angulaire (écart type)
Main levée	2.77 mm (1.54)	2.91 mm (1.52)	9.92° (6.01)
Guide statique	1.60 mm (0.92)	1.65 mm (0.82)	3.79° (2.36)

Tableau 1 : Comparaison de la précision entre le positionnement à main levée et à l'aide d'un guide statique selon *Vercruyssen et al* (75)

Par ailleurs, **l'insertion de l'implant** au travers du guide statique offre une meilleure précision par rapport à une insertion faite à main levée même si le forage est préalablement effectué avec le guide (42).

Réduction du caractère invasif de l'opération et du temps opératoire :

Bien que, dans certains cas, un levé de lambeau doit être effectué dans le cadre de reconstruction osseuse ou de remodelage muqueux, les guides chirurgicaux issus des analyses tridimensionnelles rendent possible une chirurgie sans lambeau (76). *Arisan et al* mesurent qu'une chirurgie guidée sans levé de lambeau dure en moyenne 23 minutes. Le gain de temps opératoire est alors non négligeable par rapport à une chirurgie conventionnelle dont la durée moyenne est de 69 minutes, selon l'étude de *Arisan et al* (77). Le temps totale de l'intervention peut être rallongé à cause de problèmes techniques (mise en place difficile, fracture du guide, insertion incertaine des cuillères...)

4.1.1.2 Inconvénients

Cependant, ils présentent toujours certaines limites majeures :

Ouverture buccale limitée :

A partir de l'instant où le praticien utilise un guide statique, il travaille avec des forets spécifiques de chirurgie guidée dont la longueur est augmentée (généralement de 10 mm). La limitation physiologique de l'ouverture buccale peut alors contre-indiquer des interventions au niveau des secteurs postérieurs. (78)

Difficulté d'irrigation :

L'irrigation, lors d'un forage implantaire, est nécessaire dans le but d'éviter une nécrose osseuse à cause d'une élévation de la température. L'interposition du guide sur le site implantaire bloque une irrigation suffisante. Ainsi, des études récentes recommandent certaines méthodes de refroidissement à utiliser dans le but de prévenir une élévation de la température sous guide chirurgical :

- Vitesse de forage réduite à 800 tr/min et utilisation d'une solution saline d'irrigation préalablement refroidie à 10°C (79).
- Retrait du foret et rinçage du site, avec une solution saline, de manière répétée au cours de la séquence. (80)
- Utilisation d'un système d'irrigation interne et externe (81). L'irrigation interne peut être effectuée par des forets d'implantologie qui présentent un canal central permettant d'acheminer la solution saline à l'apex (Figure 44).

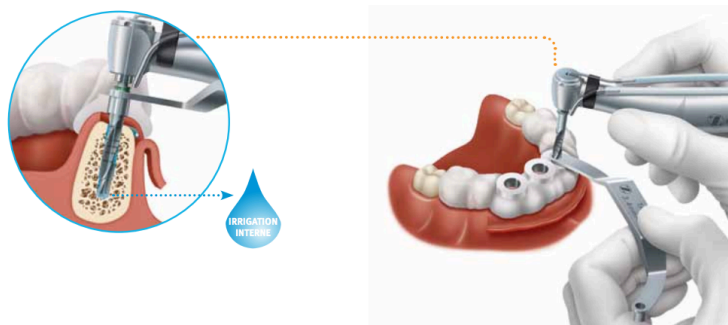


Figure 44 : Foret d'implantologie *Driva*® de la société Zimmer® (82)

Cela rajoute alors des dispositions à prévoir risquant de diminuer la reproductibilité du geste opératoire et d'en augmenter le coût.

Marge d'erreur et déviation résiduelle :

Du fait de leur conception, les guides soumettent le praticien à une indéfectible **marge d'erreur** qu'il doit prendre en compte. Cela inclut un positionnement initial incorrect, une mobilité minimale du guide lors du forage ou encore une position erronée du stop sur le foret. De plus, la friction entre le foret et la bague métallique du guide peut entraver la sensibilité manuelle du praticien et son jugement quant à la densité osseuse. (78)

Koop et al ont travaillé sur la **déviatiion résiduelle** imputée au hiatus entre la cuillère et le foret (Figure 45). Ils concluent que cette tolérance est accentuée par la longueur de l'implant, la largeur du diamètre de la cuillère, une douille de faible hauteur et/ou une cuillère trop grande. Aussi, la bague doit se situer au plus proche de l'os pour atténuer la déviation. (83)

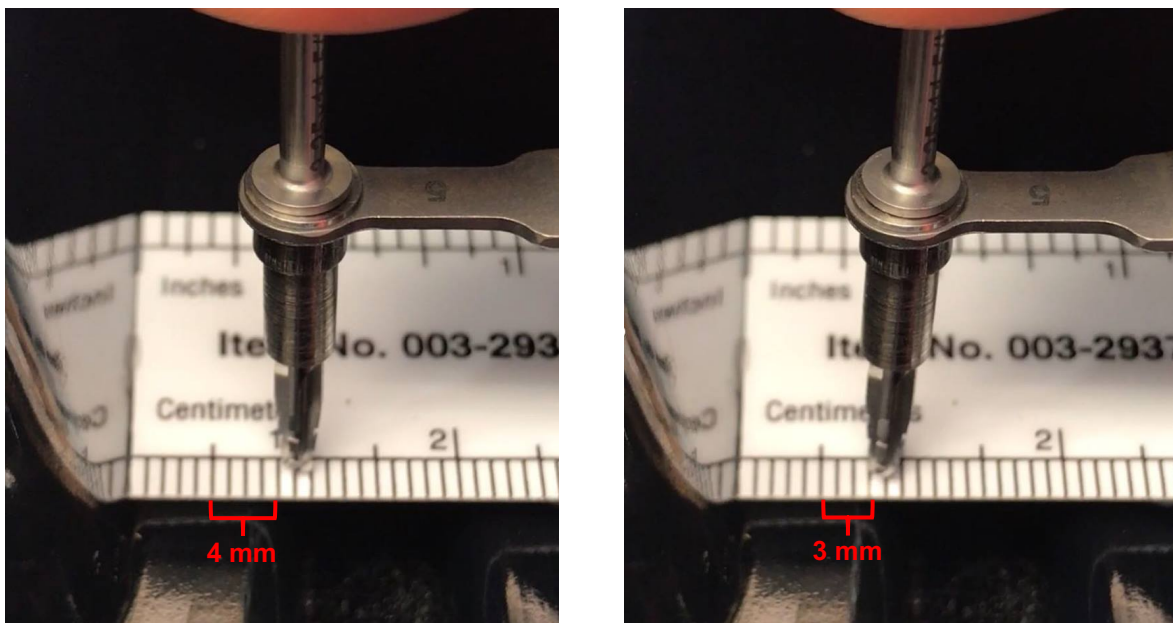


Figure 45 : Mesure de la déviation résiduelle causée par le hiatus entre la cuillère et le foret (Courtoisie du Dr. Emery)

Délai et coût :

Le prix d'un guide chirurgical est compris entre **250 et 900 euros** selon le laboratoire et le nombre de douilles. De plus, le temps écoulé entre la commande et la réception est d'environ une **dizaine de jours** (84). Il ne faut pas oublier d'ajouter le coût d'une trousse dédiée de chirurgie guidée également (Figure 46).

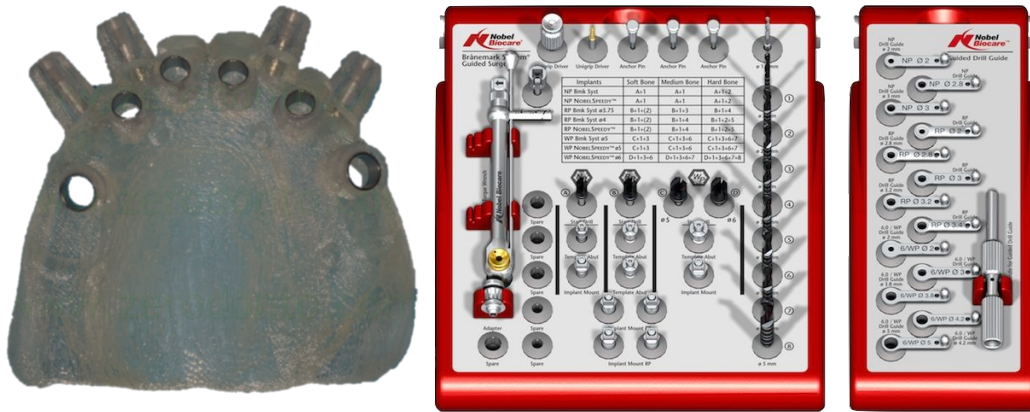


Figure 46 : Composants et instruments chirurgicaux utilisés pour une chirurgie guidée à l'aide d'un guide statique stéréolithographique de la marque NobelBiocare®, <http://sotre.nobelbiocare.com> (85)

Néanmoins, certains praticiens commencent à élaborer eux-mêmes leurs propres guides par impression 3D directement au cabinet. Ce nouveau mode de conception permet de réduire le coût du guide à une vingtaine d'euros contre un investissement initial d'environ 5000 € pour l'ensemble de l'équipement. Le délai peut être également réduit à une demi-journée comprenant l'impression et la préparation du guide avec les douilles métalliques. (86)

Cependant, le praticien doit prévoir du temps de préparation et de réalisation au détriment du temps passé au fauteuil. L'élaboration des guides directement au cabinet peut être envisageable à condition de confier ce service à du personnel dédié.

4.1.2 Système passif de navigation

Utilisés depuis un peu plus d'une dizaine d'années, les systèmes de navigation ont considérablement évolué et deviennent de plus en plus accessibles pour les praticiens libéraux.

4.1.2.1 Avantages

Face aux inconvénients des guides statiques de CAO, les systèmes passifs apportent des avantages précieux pour le chirurgien.

Précision élevée :

Récemment, Block et al ont travaillé sur la navigation en implantologie. Les résultats de leur étude (52) ont montré que le positionnement d'un implant à l'aide de ce système est :

- **Plus précis** qu'une mise en place à main levée ou avec un guide non limitant.
- **Au moins aussi précis** par rapport à l'utilisation d'un guide limitant stéréolithographique de CAO.

	Déviatiion du centre de la plateforme (écart type)	Déviatiion de l'apex (écart type)	Déviatiion angulaire (écart type)
Main levée	1.15 mm (0.59)	2.21 mm (0.99)	7.69° (4.92)
Navigation	0.87 mm (0.42)	0.96 mm (0.66)	3.62° (2.73)

Tableau 2 : Mesures relevées dans l'étude entre le positionnement à main levée et par guidage dynamique, Block M. (52)

Cette étude va dans le sens de précédents résultats obtenus par Chiu et al (87), Kramer et al (88), Brief et al (89), et Casap et al (90). Ils concluaient déjà, plus de 10 ans auparavant, que la navigation dynamique pouvait avoir une précision de 0,4 mm de déviation à l'entrée et de 4° de déviation angulaire.

Enfin, dans une étude très récente de décembre 2018, *Chen et al.* ont cherché à comparer la précision du positionnement de l'implant sous navigation dynamique par rapport au guide statique et à la technique à main levée (91). L'étude révèle que :

- Le système de **navigation et le guide limitant** sont plus précis que la technique à main levée concernant le **centre de la plateforme, l'apex et l'angulation**.
- **Comparativement** au guide statique limitant, la **navigation** dynamique offre une précision significativement supérieure concernant la **déviati on angulaire**.

	Déviati on du centre de la plateforme (écart type)	Déviati on de l'apex (écart type)	Déviati on angulaire (écart type)
Main levée	1.44 mm (0.56)	2.00 mm (0.79)	9.26° (3.62)
Guide limitant	1.02 mm (0.46)	1.50 mm (0.79)	6.02° (3.71)
Navigation	1.07 mm (0.48)	1.35 mm (0.55)	4.45° (1.97)

Tableau 3 : Mesures relevées dans l'étude de *Chen et al.* entre le positionnement à main levée, à l'aide d'un guide statique limitant et par guidage dynamique (91)

Sécurité :

L'assistance au positionnement avec un contrôle en temps réel offre une certaine amélioration de la sécurité pour le patient. D'abord, le praticien n'utilise pas de guide statique venant recouvrir le site opératoire, le contraignant à réaliser son forage à « l'aveugle ». Cela résout la difficulté **d'irrigation** du guide et offre une **vision directe** pour l'assistant(e) opératoire qui peut alors contrôler le bon déroulement de l'opération. De plus, le rétrocontrôle sur la situation intra-osseuse du forage donne au chirurgien plus d'assurance sur son geste opératoire.

Un autre avantage exclusif, lié à la sécurité apportée par cette technique, est la **possibilité de changer ou d'ajuster la planification initiale au cours de l'opération**. La planification se basant sur les examens tomographiques pré-opératoires, il peut s'avérer nécessaire que le praticien décide de modifier le positionnement ou l'implant initialement prévu. (92)

Efficacité et praticité opératoire :

A l'instar du guide statique, le praticien est également prédisposé, si les conditions le permettent, à réaliser une **chirurgie sans lambeau** (hormis pour le patient édenté). En revanche, du fait d'une trousse instrumentale plus petite et avec des forets plus courts, il réduit davantage le **temps opératoire** et dispose d'un **meilleur accès** aux secteurs postérieurs (93). En effet, contrairement au système semi-actif, il n'y a pas besoin de foret spécifique ou d'instrument chirurgical supplémentaire. Le chirurgien peut conserver sa trousse d'implantologie classique.

Enfin, dans une zone où l'espace interdentaire est restreint, la mise en place de l'implant peut être guidée par le système sans difficulté. Par exemple, le secteur incisif mandibulaire peut contre-indiquer une chirurgie guidée statique car il n'y a pas la place nécessaire pour la douille métallique. (94)

Flux de travail optimisé et ouverture du système :

Les systèmes de navigation ont évolué ces dernières années à mesure qu'il est aujourd'hui possible d'affirmer au patient que toute la gestion de la pose d'un implant peut être faite en un seul et même jour (52) (95). Pour illustrer ces propos, il convient de résumer l'ensemble du flux de travail par une maquette de déroulement pour le patient denté (Figure 47) et pour le patient édenté (Figure 48). Le système X-Guide® est un système ouvert qui se veut compatible avec n'importe quelle caméra optique ou Cône Beam à partir du moment où les fichiers à traiter sont dans des formats ouverts (STL pour l'empreinte optique et DICOM pour l'imagerie tridimensionnelle).

➤ Patient denté :

CONSULTATION

1 X-Clip (< 5 minutes)



Réchauffer le repère radio-opaque (X-Clip) dans de l'eau chaude et venir réaliser l'empreinte sur les 2 à 3 dents supports en appuyant fermement.
Refroidir ensuite le X-Clip dans de l'eau froide (20 secondes).
Un « clip » à l'insertion confirme que la clé de repositionnement est exploitable.

2 Examens 3D (< 10 minutes)

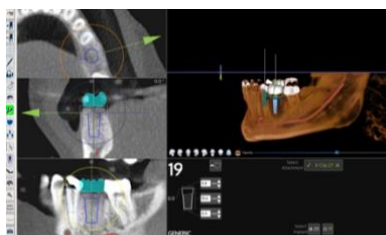
Replacer le repère en bouche et réaliser l'examen CBCT.



3 Planification (< 15 minutes)

Planifier l'ensemble de l'opération directement sur le logiciel du système de navigation.

A l'aide d'un scanner intra-oral, il est nécessaire de « matcher » les données STL des arcades en occlusion avec les données DICOM du CBCT. Cela permettra d'intégrer les futures couronnes provisoires supra-implantaires dans la planification.



CHIRURGIE

4 Calibrage (< 5 minutes)



Avant d'installer le patient au fauteuil, calibrer le marqueur-instrument et le marqueur arcade. Cette manipulation n'excède pas plus de 5 minutes. L'étape de calibrage permettant la « virtualisation » des instruments et le suivi en temps réel est capitale.

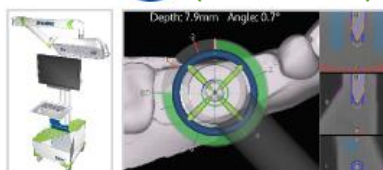
5 Validation (< 1 minutes)

Une fois le patient installé au fauteuil, replacer en bouche le X-Clip avec son marqueur-arcade sur les dents supports.

Toucher le centre de la plaque de validation (Go-Plate) avec le premier foret de la séquence et confirmer la localisation en touchant un point anatomique précis.



6 Séquence opératoire (< 15 minutes)



Initier la séquence opératoire de forage en suivant les informations interactives présentées sur le moniteur en temps réel.

Chaque foret/implant doit être validé sur la Go-Plate avant d'être utilisé.

Figure 47 : Flux de travail pour le patient denté avec le système de navigation X-Guide (d'après la société X-NAV Technologies)

➤ Patient édenté :

CONSULTATION

1 Vis d'ostéosynthèse (< 15 minutes)



Positionnement des 5 vis d'ostéosynthèse nécessaires à l'examen tridimensionnel sur le procès vestibulaire de l'arcade.

2 Examens 3D (< 10 minutes)

Réalisation de deux examens CBCT :

- CBCT de la prothèse amovible totale seule présentant des marqueurs radio-opaques non métalliques.
- CBCT du patient avec la prothèse amovible totale en bouche toujours avec les marqueurs.

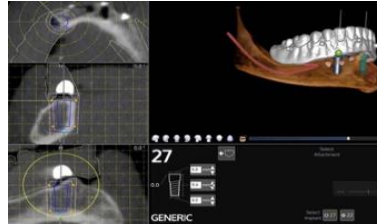


3 Planification (< 15 minutes)

Sur le logiciel, aligner le fichier DICOM de l'appareil seul avec le fichier DICOM de l'appareil en bouche en reliant les marqueurs.

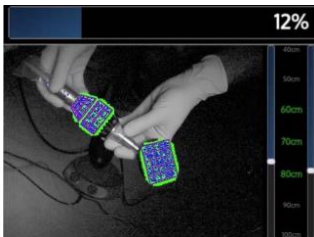
Pointer la tête et la pointe de chacune des 5 vis.

Planifier la chirurgie en positionnant les implants de manière optimale.



CHIRURGIE

4 Calibrage du marqueur-instrument (< 5 minutes)



Calibrer le marqueur-instrument de la même manière que pour le patient denté à l'aide de disque d'insert.

5 Montage du marqueur-arcade avec le E-Clip (< 10 minutes)

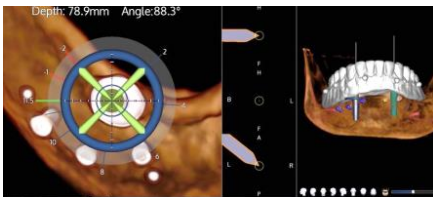
Exposer la surface osseuse du procès vestibulaire jusqu'à retrouver les 5 vis.

Fixer la plaque E-Clip à l'aide de vis transcorticales à proximité du site implantaire.

Monter le marqueur-arcade sur l'attache du E-Clip.



7 Séquence opératoire (< 20 minutes)

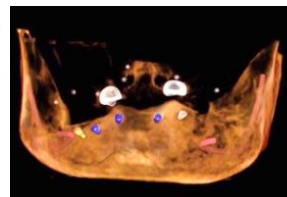


Initier la séquence opératoire de forage de la même manière que pour le patient denté.

Si une vis d'ostéosynthèse se trouve sur une axe de forage celle-ci peut être retirée avant la fin de l'intervention.

Chez le patient édenté la chirurgie se fait avec un levé de lambeau entraînant une étape de suture une fois les implants positionnés.

6 Calibrage du marqueur-arcade (< 10 minutes)



Calibrer le marqueur-arcade en touchant chacune des 5 têtes de vis avec le contre-angle opératoire.

Réaliser ensuite un contrôle du calibrage des marqueurs instruments et arcades.

Figure 48 : Flux de travail pour le patient édenté avec le système de navigation X-Guide (d'après la société X-NAV Technologies)

Ergonomie :

La profession de chirurgien-dentiste est largement touchée par les **troubles musculo-squelettiques**. Souvent, le praticien adopte une position défavorable dans bon nombre d'actes pour garder la meilleure vision directe possible sur son champ opératoire. Il en résulte alors une augmentation des risques de présenter des traumatismes du cou, des lombaires et de l'épaule. (96)

En utilisant cette technologie, le praticien profite d'une **vision indirecte** sur l'ensemble du champ opératoire représenté sur le moniteur. Cela lui permet d'avoir une **position ergonomique optimale**. (97)

4.1.2.2 Inconvénients

Malgré ces aspects, il reste tout de même quelques difficultés inhérentes aux systèmes de navigation.

Courbe d'apprentissage :

Ces dernières années, les logiciels internes des systèmes ont été ré-agencés et codifiés pour rendre la prise en main plus facile. Mais utiliser un système de navigation change beaucoup de repères pour le chirurgien. Ce dernier doit passer par une phase d'apprentissage sur l'utilisation de l'appareil.

Dans la littérature, la plupart des articles à propos de la navigation mentionnent cette courbe d'apprentissage. Une étude récente (43) menée dans le but de la quantifier, témoigne que l'essentiel de la marge de progression s'étend sur 5 interventions. D'autres auteurs préconisent environ 20 cas avant de pouvoir être à l'aise avec le système (52). La coordination œil-main peut être difficile à maîtriser (98).

Aussi, que ce soit pour le guidage statique ou pour la navigation dynamique la planification préchirurgicale est plus chronophage par rapport à une technique traditionnelle à main levée. (35)

Investissement initial :

Le coût financier initial est un autre challenge d'un tel système. Aujourd'hui, il faut compter entre 20 000 € et 30 000 € (57) pour en faire l'acquisition. Par exemple, le prix d'achat du X-Guide est de 29 500 \$ (soit un peu plus de 25 000 €) comprenant également l'installation, la licence du logiciel et une formation d'une demi-journée. Il faut ajouter à cela :

- Les frais de livraison
- L'achat d'un dispositif jetable X-Clip par arcade (99 \$)

Toutefois, sur le long terme, à partir du moment où cet investissement est amorti, l'intervention est alors moins coûteuse par rapport à l'utilisation d'un guide chirurgical confectionné par un laboratoire.

Risque d'effet entonnoir :

Somogyi-Ganss rapporte que le praticien doit garder un geste régulier et assuré. De multiples autocorrections, suite aux informations retransmises en temps réel, peuvent élargir l'entrée du forage et ainsi diminuer la stabilité primaire de l'implant. (99)

Interférences et complications techniques :

Par rapport aux systèmes semi-actifs, on note une réduction des erreurs possibles **intrinsèques** (liées à la machine) et **extrinsèques** (liées à l'homme). En effet, en s'épargnant l'étape de conception et de fabrication du guide statique, on supprime les biais correspondants. (61)

Le chirurgien doit cependant veiller à quelques difficultés possibles (97) :

➤ Interférence optique :

Dans un système de navigation, les interférences optiques sont courantes. Elles sont liées à l'interposition d'un obstacle entre les stéréo-caméras et les marqueurs (arcade et/ou instrument). Au plus ces derniers auront de grandes dimensions, au plus les interférences seront fréquentes. En conséquence, les opérateurs doivent apprendre à travailler dans le volume de suivi chirurgical sans masquer ces dispositifs dont la forme et la position devront être optimisées.

➤ Bascule du marqueur-arcade

Il est primordial de s'assurer que le repère radio-opaque portant le marqueur-arcade soit correctement positionné et bien maintenu tout au long de la chirurgie. Des contrôles réguliers sur des points anatomiques précis permettent de vérifier que le marqueur ne soit pas déplacé et que le suivi dynamique soit toujours exact.

➤ Mouvement accidentel du patient

Concentré sur le moniteur, le chirurgien ne peut plus anticiper des mouvements accidentels du patient. C'est pour cela qu'un assistant opératoire doit rester concentré sur le patient tout au long de la chirurgie.

La littérature ne fait pas mention de l'existence d'un danger lié aux mouvements du patient mais on peut se poser la question sur un éventuel risque de morbidité en cas de mouvement brusque. En effet, l'opérateur ayant des points d'appui différents par rapport à une chirurgie conventionnelle, la gestuelle peut être davantage compromise.

4.2 Critères décisionnels sur l'utilisation des systèmes d'assistance peropératoire

Les recherches bibliographiques ont permis de distinguer les avantages et inconvénients de chacun de ces systèmes. Une question légitime peut alors se poser pour le praticien : quels critères conduiront le chirurgien à utiliser un guide statique ou un système de navigation dynamique dans le cadre d'une chirurgie implantaire ? Cela revient à déterminer les indications cliniques adaptées à chacun de ces outils thérapeutiques.

4.2.1 Indications

Block et Emery ont récemment défini les différentes indications liées aux systèmes d'assistance peropératoire de positionnement (100).

4.2.1.1 Communes aux deux systèmes

Si les systèmes d'assistance ne sont pas forcément indispensables pour le chirurgien, ils confèrent un avantage évident par rapport à une chirurgie à « main levée » dans les indications suivantes :

- Approche sans lambeau pour une chirurgie moins invasive.
- Nécessité de précision accrue (gestion d'espace entre implants et dents adjacentes...).
- Intervention en zone esthétique où l'implant doit respecter une angulation stricte.
- Obstacle anatomique intime au site de forage (notamment parois et plancher sinusiens ainsi que le canal mandibulaire inférieur).

4.2.1.2 Propres aux guides statiques

Dans la littérature, une question est soulevée par certains auteurs : comment justifier l'amplification du caractère invasif afférente au calibrage du navigateur chez un patient édenté comparé à un guide statique muco-supporté ? (101)

Ainsi, les guides statiques conservent plusieurs indications **exclusives au patient édenté**, dans les cas suivants :

- Choix d'une **chirurgie sans lambeau**.
- Si une **réduction de crête osseuse** sous guide est envisagée afin de préparer l'espace nécessaire aux implants et à la future prothèse. Cette indication concerne les patients présentant une crête alvéolaire trop fine. *Scott D. Ganz* illustre ce cas précis dans un article de revue ajouté en annexe 1 à la page 99 (102).
- Dans le cas où le **positionnement** des implants doit avoir la **précision la plus stricte** pour la réalisation d'un **bridge complet implanto-porté** planifié.
- Et lorsque le guide statique est lui-même utilisé pour réaliser le **bridge complet provisoire préalablement à la chirurgie et mis en charge immédiatement** (voir l'extrait également placé en annexe 2 à la page 105, issu du chapitre « Treatment Planning and Perioperative Management of the Dental Implant Patient » présenté par *Michael S. Block*).

Il est également rapporté que le positionnement de l'implant sur un **site anatomique irrégulier** de type post-extractionnel est facilité par la guide statique. En effet, le guidage mécanique permet d'éviter plus efficacement une éventuelle déviation au point d'émergence de l'implant. (103)

4.2.1.3 Propres aux systèmes de navigation

De la même manière, les cas suivants sont des indications plus adaptées pour les navigateurs :

- Le patient présente une **ouverture buccale limitée**.
- Si le chirurgien souhaite **poser les implants le même jour que la réalisation des examens tridimensionnels**. Cette condition ne peut plus être considérée de manière générale à partir du moment où il est maintenant possible de fabriquer un guide stéréolithographique en moins d'une demi-journée directement au cabinet (86).
- **L'accès est difficile** avec un site implantaire situé au niveau d'un secteur dentaire postérieur (deuxième molaire).
- La **vision directe est difficilement praticable** pour l'opérateur.

- Quand le guide statique ne peut pas être utilisé à cause d'un **espace interdentaire trop faible** pour recevoir la douille métallique.
- La **prise d'empreinte est impossible** à cause d'un réflexe nauséux accentué (indication valable seulement dans le cadre de l'empreinte traditionnelle nécessaire à la réalisation du guide statique).

4.2.2 Organigramme décisionnel récapitulatif

Utilisés de manière complémentaire, le guide statique et le navigateur neutralisent leurs propres inconvénients. Le chirurgien est ainsi capable de réaliser une chirurgie guidée dans la plupart des situations cliniques. Pour finir, un arbre décisionnel (Figure 49) reprenant les indications des deux systèmes peut être construit. Le but est de conduire le praticien vers la technique de chirurgie guidée la plus adaptée au patient qu'il doit soigner selon les données actuelles de la science.

Explication de la démarche à suivre pour le choix de la technique d'assistance peropératoire (Figure 49) :

- A partir du moment où le patient ne présente **pas de contre-indication** à la chirurgie, le processus de choix débute par l'analyse de l'ouverture buccale du patient. Physiologiquement, la valeur de référence pour une ouverture buccale normale est de 47,7 +/-7 mm (104). Une ouverture buccale inférieure à cette fourchette est alors diagnostiquée comme limitée. En fonction de la limitation, il existe un grade : légère, modérée ou serrée. De ce fait, si le patient présente une **limitation de l'ouverture buccale** et qu'elle se révèle insuffisante en fonction du secteur à implanter, il sera préférable d'utiliser un système de navigation.
- Si l'ouverture buccale du patient est suffisante mais que **l'empreinte traditionnelle** n'est pas réalisable, le praticien doit se diriger vers la navigation. *Cette condition est uniquement valable hors du cadre du flux numérique (empreinte optique intrabuccale).*

- Dans le cas où l'**intervention** chirurgicale doit avoir lieu le **même jour** que celle de la planification, il est préférable de se tourner vers un appareil de navigation dynamique également. *Cette condition est uniquement valable en l'absence d'imprimante 3D au sein du cabinet et dans l'impossibilité de préparer le guide en interne dans la journée.*
- Sur un **site anatomique irrégulier** de type post-extractionnel (dans le cadre d'extraction-implantation par exemple), le guide statique est plus recommandé (cf. 4.2.1.2 p.83). *A condition qu'il n'y ait pas de contre-indication à son utilisation.*
- Enfin, s'il réside un **doute sur la planification**, il est préférable de s'orienter sur un système de navigation dynamique qui permet à l'opérateur un éventuel changement de planification au cours de l'intervention.
- Une fois ces conditions vérifiées, le choix du chirurgien doit se faire en fonction de la denture de son patient.
 - Comme évoqué plus haut, pour un **patient édenté**, il est beaucoup plus invasif d'utiliser la navigation par rapport à un guide statique muco-supporté dans le cas où la **chirurgie sans lambeau est permise** par le terrain clinique du patient. La mise en place des mini-vis sous périostées ainsi que le support du marqueur-arcade représentent un risque augmenté de morbidité et de suites post-opératoires. C'est avec cette condition qu'il est recommandé d'utiliser un guide statique à appui muqueux pour la réalisation d'un bridge complet implanto-porté.

Parfois, le terrain clinique **ne permet pas une chirurgie sans lambeau** notamment dans le cadre d'une chirurgie per-implantaire où une reconstruction des bases osseuses doit avoir lieu. Ainsi, l'ensemble des chirurgies per-implantaires peuvent être traitées par navigation dynamique ou guidage statique sauf pour 2 situations où le guide statique conserve une meilleure recommandation :

- Pour une **réduction de crête osseuse**, le protocole conventionnel consiste à d'abord diminuer la crête osseuse dans un premier temps puis dans un second temps de procéder à l'insertion des implants (105). Pour effectuer ces deux opérations, un appareil de navigation n'aurait plus la bonne topographie anatomique réelle suite à la réduction de crête. C'est pour cette raison qu'il est indiqué de réaliser ce type de chirurgie à l'aide de deux guides statiques (un premier pour la réduction et un second pour le positionnement des implants, voir article en annexe 1).
 - Dans le cadre de la réalisation d'un **bridge complet implanto-porté**, il faut aussi privilégier le guidage statique pour les mêmes raisons citées ci-dessus dans le paragraphe portant sur les indications propres aux guides statiques à la page 83.
- Si le **patient est denté**, d'autres critères sont à prendre en compte pour faire le choix d'utiliser le guide statique ou la navigation dynamique :
 - Si le **site implantaire** est situé au niveau de la deuxième molaire, alors la navigation est recommandée (même avec une ouverture buccale normale).
 - Il est possible de prévoir que le **champ de vision** directe sera perturbé par différents obstacles (dents, muscles, joue, langue volumineuse,...) ou pas assez ergonomique pour le praticien. Dans ce cas, la navigation doit être privilégiée également.
 - Le **site anatomique** irrégulier (site post-extractionnel) privilégie l'usage d'un guide statique permettant un meilleur contrôle du forage.
 - Dans le cas d'un **édentement** terminal sur un site régulier, guide statique ou navigation dynamique sont possibles. Il en va alors de la préférence du praticien.
 - A l'inverse, pour une restauration encastrée, **l'espace interdentaire** peut être trop étroit pour que le guide (incluant les douilles de forage) puisse être mis en place. Toutefois, si cet espace est suffisant également sur un site régulier, alors le guide statique ou la navigation dynamique peuvent être utilisés à la guise du praticien.

Technique indiquée

N : Navigation dynamique

G : Guidage statique

G ou N : Navigation dynamique ou Guidage statique *

* Pour une raison économique, il sera plus intéressant d'opter pour une technique sous navigation dynamique



★ Valable hors du cadre du flux numérique (empreinte optique).

☆ Valable en l'absence de la possibilité de préparer le guide en interne dans la journée.

Figure 49 : Sélection de la technique d'assistance peropératoire en fonction du terrain clinique spécifique au patient

Conclusion

Depuis quelques années, le guidage passif connaît un regain d'intérêt dans le monde médical. L'intérêt d'une innovation pour la communauté scientifique peut se mesurer sensiblement par une analyse bibliométrique. Il s'agit de dénombrer la quantité d'articles scientifiques publiés sur le sujet de la navigation (Figure 50). Pour cela, une requête est effectuée dans la base de données bibliographiques « PubMed » avec pour éléments de recherche les articles contenant les mots clés :

📖 « **navigation** » en titre/résumé ET « **dental implant** » en titre/résumé

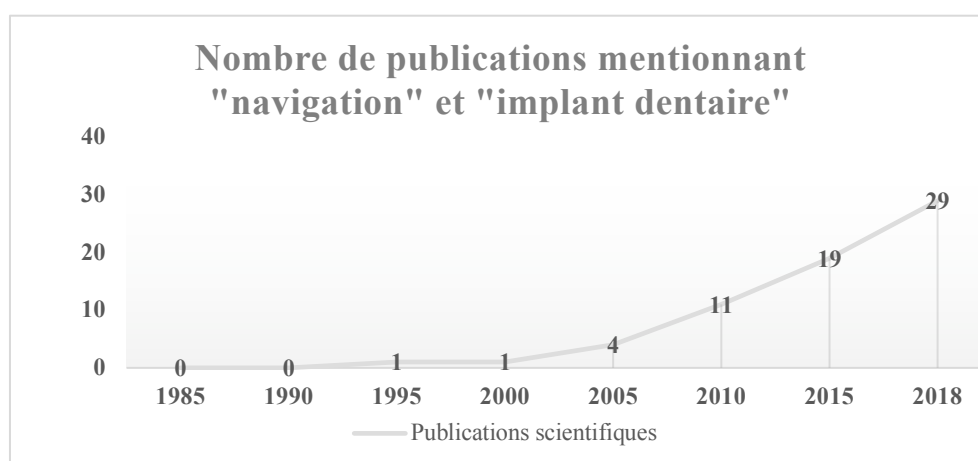


Figure 50 : Nombre de publications mentionnant « navigation » et « implant dentaire » dans le titre et/ou le résumé (Base de données : PubMed)

Bien que le nombre d'articles reste encore faible, on assiste à une augmentation significative des publications au cours des dernières années traduisant une attention de plus en plus grande, des praticiens sur l'application des navigateurs en implantologie orale. Aujourd'hui, le recul clinique est supérieur à 15 ans.

Le digital faisant maintenant parti du quotidien des chirurgiens-dentistes permet d'évoluer considérablement l'implantologie orale. La gestion du positionnement implantaire est entièrement revue par la technologie numérique. Guidage statique et dynamique portent la chirurgie à un autre niveau en termes de précision et de prédictibilité.

Aujourd'hui, le guidage statique est utilisé régulièrement par certains implantologues. Davantage de cabinets modernes possèdent des appareils d'imagerie tridimensionnelle, des scanners optiques ou encore des imprimantes 3D pour la fabrication des guides chirurgicaux.

Parallèlement, l'investissement initial et la courbe d'apprentissage liés aux systèmes de navigation restent un véritable frein pour la majorité des praticiens. Cependant, la technologie ne cesse d'avancer, les coûts diminuent et les protocoles sont simplifiés pendant que les praticiens sont de plus en plus exposés à cette technologie. L'intérêt de la navigation en implantologie n'est plus à démontrer dans la littérature mais doit encore être confirmé d'un point de vue clinique. Son utilisation ne permet pas « encore » de traiter l'ensemble des situations cliniques notamment chez un patient édenté.

Les recherches faites dans le cadre de cette thèse peuvent évoquer que l'empreinte optique est au prosthodontiste ce que la navigation est à l'implantologue. Il est alors aisé d'imaginer pour la navigation un avenir sensiblement identique aux systèmes d'empreinte optique qui gagnent de plus en plus l'attention des praticiens suites aux avancées techniques majeures de ces dernières années.

Pour conclure ce travail, quelle que soit la technique sélectionnée, l'essentiel est d'assurer un positionnement permettant d'apporter au patient le meilleur succès thérapeutique possible. Alors que ce dessein peut être réalisé par une approche dite « à main levée », les systèmes statiques et dynamiques donnent lieu à un résultat plus prédictible. Ainsi, la navigation dynamique est devenue un outil de choix en implantologie. Cependant, devant l'ensemble des situations cliniques, cela engage le praticien à savoir également travailler avec le guide statique s'il souhaite rester dans le cadre de la chirurgie guidée.

Figures

Figure 1 : Relation entre la chirurgie assistée par ordinateur (navigateur/localisateur) et la robotique chirurgicale, d'après Rodriguez F. (2).....	18
Figure 2 : Repères chronologiques en robotique médicale, Troccaz J. (3)	20
Figure 3 : Processus conventionnel de la CAO, Taylor R. (18).....	24
Figure 4 : Système semi-actif Mazor SpineAssist [®] , Divi S. (26).....	27
Figure 5 : Système passif de chirurgie par navigation électromagnétique. https://longshortreport.com (29)	28
Figure 6 : Système actif autonome STAR [®] , Shademan A. (32)	29
Figure 7 : Système télé-opéré Da Vinci [®] , Guillemain F. (33).....	30
Figure 8 : Concept de zones de confort et de danger dans les 3 dimensions de l'espace, Wiley J. (39)	33
Figure 9 : Stabilisation du guide chirurgical à l'aide d'une clé en résine, Davarpanah K. (46)	35
Figure 10 : Illustrations des guides à appui muqueux (a), osseux (b), dentaire (c), Davarpanah K. (46).....	36
Figure 11 : Guide à appui muqueux non limitant, http://www.centreschneck.fr (48)..	37
Figure 12 : Guide à appui dentaire semi-limitant, http://www.studio32dental.com (49)	37
Figure 13 : Guide à appui muqueux limitant,.....	37
Figure 14 : Guide chirurgical dento-porté virtuel réalisé à l'aide d'un logiciel de planification, http://canaray.com (51)	38
Figure 15 : Chirurgie implantaire par navigation, courtoisie du Dr. Emery (53).....	39
Figure 16 : Acrobot Navigation [®] , http://www.grasshopper-hosting.co.uk (56).....	40
Figure 17 : Marqueurs actifs instrument et arcade du système Robodent [®] , Armand S. (60).....	42
Figure 18 : Superposition du volume de suivi chirurgical matérialisé en vert avec le système de coordonnées, courtoisie du Dr. Emery (61)	42
Figure 19 : Configuration classique d'un système de chirurgie guidée par l'image préopératoire, Digioia A. (59)	43
Figure 20 : Repère radio-opaque de référence du système Navident [®] correspondant à une gouttière en Stent's [®] avec son élément radio-opaque, Burgess D. (64).....	44
Figure 21 : Superposition du volume d'acquisition avec le système de coordonnées, courtoisie du Dr. Emery (61)	45
Figure 22 : Calibrage d'un instrument de navigation, Lombard B. (55).....	46
Figure 23 : Première chirurgie implantaire effectuée par un système robotique autonome, http://wemedia.ifeng.com (67)	49
Figure 24 : Système de navigation X-guide [®] , Tolstunov L. (68).....	50
Figure 25 : Marqueur arcade (à gauche) et marqueur instrument (à droite), Legac O. (69).....	50
Figure 26 : Réflexion de la lumière bleue vers les stéréo-caméras à partir des marqueurs, Block M. (50).....	51
Figure 27 : X-Clip avec le matériau thermoformable à gauche et placé sur l'arcade à droite, Legac O. (69)	53
Figure 28 : Vis d'ostéosynthèse placées le long d'un modèle d'arcade mandibulaire édentée, Emery R. (70).....	54
Figure 29 : Importation des données DICOM (Courtoisie du Dr. Emery)	55
Figure 30 : « Matching » des fichiers DICOM et STL (Courtoisie du Dr. Emery).....	56
Figure 31 : Planification du projet implantaire et prothétique (Courtoisie du Dr. Emery)	57

Figure 32 : Prothèse amovible totale maxillaire avec des marqueurs radio-opaques adhésifs et non métalliques, http://www.oralartsdental.com (72)	58
Figure 33 : Calibrage du corps de l'instrument (Courtoisie du Dr. Emery)	59
Figure 34 : Calibrage du mandrin avec le disque d'insert (Courtoisie du Dr. Emery)	59
Figure 35 : Axes et mouvements suivis par le système de navigation, Tolstunov L. (68).....	60
Figure 36 : Calibrage du marqueur-arcade vissé sur le X-Clip (Courtoisie du Dr. Emery)	60
Figure 37 : Validation du calibrage (Courtoisie du Dr. Emery)	61
Figure 38 : Vissage du E-Clip sur le procès maxillaire avec le marqueur-arcade monté (Courtoisie du Dr. Emery).....	63
Figure 39 : Écran de navigation au début de la séquence de forage (Courtoisie du Dr. Emery)	64
Figure 40 : Cible de guidage du système X-guide® (Courtoisie du Dr. Emery)	65
Figure 41 : Champ opératoire d'une chirurgie sous navigation dynamique (Photographie personnelle).....	66
Figure 42 : Champ de vision du praticien et de l'assistante (Courtoisie du Dr. Emery)	66
Figure 43 : Critères de comparaison pour évaluer la précision, Kang B. (73)	68
Figure 44 : Forêt d'implantologie Driva® de la société Zimmer® (82)	70
Figure 45 : Mesure de la déviation résiduelle causée par le hiatus entre la cuillère et le forêt (Courtoisie du Dr. Emery).....	71
Figure 46 : Composants et instruments chirurgicaux utilisés pour une chirurgie guidée à l'aide d'un guide statique stéréolithographique de la marque NobelBiocare®, http://sotre.nobelbiocare.com (85).....	72
Figure 47 : Flux de travail pour le patient denté avec le système de navigation X-Guide (d'après la société X-NAV Technologies)	76
Figure 48 : Flux de travail pour le patient édenté avec le système de navigation X-Guide (d'après la société X-NAV Technologies)	77
Figure 49 : Sélection de la technique d'assistance peropératoire en fonction du terrain clinique spécifique au patient	87
Figure 50 : Nombre de publications mentionnant « navigation » et « implant dentaire » dans le titre et/ou le résumé (Base de données : PubMed).....	88

Tableaux

Tableau 1 : Comparaison de la précision entre le positionnement à main levée et à l'aide d'un guide statique selon Vercruyssen et al (75)	69
Tableau 2 : Mesures relevées dans l'étude entre le positionnement à main levée et par guidage dynamique, Block M. (52).....	73
Tableau 3 : Mesures relevées dans l'étude de Chen et al. entre le positionnement à main levée, à l'aide d'un guide statique limitant et par guidage dynamique (91)	74

Références bibliographiques

1. Dada K, Daas M. Esthétique et implants pour l'édenté complet maxillaire. Quintessence. 2011.
2. Rodriguez F. Computer and Robotic Assisted Orthopaedic Surgery. 4th Biennial North American Summer School on Surgical Robotics; 2014 juin; Pittsburgh.
3. Troccaz J. Robotique médicale. Lavoisier; 2012. 459 p.
4. Benassarou M, Benassarou A, Meyer C. La navigation en chirurgie orthognathique. Application à l'ostéotomie de Le Fort I. Rev Stomatol Chir Maxillo-Faciale Chir Orale. 1 sept 2013;114(4):219-27.
5. Larousse É. Larousse.fr : encyclopédie et dictionnaires gratuits en ligne [Internet]. [consulté le 2 févr 2018]. Disponible sur: <http://www.larousse.fr/>
6. Taylor RH, Stoianovici D. Medical robotics in computer-integrated surgery. IEEE Trans Robot Autom. oct 2003;19(5):765-81.
7. Valero R, Ko YH, Chauhan S, Schatloff O, Sivaraman A, Coelho RF, et al. Robotic surgery: History and teaching impact. Actas Urol Esp Engl Ed. 1 oct 2011;35(9):540-5.
8. Goutefangea P. Isaac Asimov : les (quatre) “ lois de la robotique ” et l'échange de paroles [Internet]. 2016 [consulté le 13 mars 2018]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01397948>
9. Yang G-Z, Cambias J, Cleary K, Daimler E, Drake J, Dupont PE, et al. Medical robotics—Regulatory, ethical, and legal considerations for increasing levels of autonomy. Sci Robot. 15 mars 2017;2(4):eaam8638.
10. Faust RA. Robotics in Surgery: History, Current and Future Applications. Nova Publishers; 2007. 336 p.
11. Liu H-H, Li L-J, Shi B, Xu C-W, Luo E. Robotic surgical systems in maxillofacial surgery: a review. Int J Oral Sci. juin 2017;9(2):63-73.
12. Pugin F, Bucher P, Morel P. Histoire de la chirurgie robotique : d'AESOP à Da Vinci ® en passant par Zeus ®. J Chir Viscérale. 2011;148(5, Supplement):S3-8.
13. Gomes P. Surgical Robotics: Reviewing the Past, Analysing the Present, Imagining the Future. Robot Comput-Integr Manuf. avr 2011;27(2):261–266.
14. Faria C, Vale C, Machado T, Erlhagen W, Rito M, Monteiro S, et al. Experiential Learning of Robotics Fundamentals Based on a Case Study of Robot-Assisted Stereotactic Neurosurgery. IEEE Trans Educ. mai 2016;59(2):119-28.
15. Intuitive Surgical - News Release [Internet]. [consulté le 18 juill 2018]. Disponible sur: <http://investor.intuitivesurgical.com/mobile.view?c=122359&v=203&d=1&id=2325993>
16. Reichensperner H, Damiano RJ, Mack M, Boehm DH, Gulbins H, Detter C, et al. Use of the voice-controlled and computer-assisted surgical system ZEUS for endoscopic coronary artery bypass grafting. J Thorac Cardiovasc Surg. juill 1999;118(1):11-6.
17. DAVARPANAH M, SZMUKLER-MONCLER S. Implantologie assistée par ordinateur. CDP; 2010. 241 p. (JPIO).
18. Taylor RH, Menciassi A, Fichtinger G, Fiorini P, Dario P. Medical Robotics and Computer-Integrated Surgery. In: Springer Handbook of Robotics. Springer, Cham; 2016. p. 1657-84.
19. HAIGRON P. Chirurgie assistée par ordinateur (CAO) [Internet]. Inserm. 2016 [consulté le 19 mars 2018]. Disponible sur: <https://www.inserm.fr/information-essante/dossiers-information/chirurgie-assistee-par-ordinateur-cao>
20. Stiehl JB, Konermann WH, Haaker RG. Navigation and Robotics in Total Joint and Spine Surgery. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2004.
21. Troccaz J, Peshkin M, Davies B. Guiding systems for computer-assisted surgery: introducing synergistic devices and discussing the different approaches. Med Image Anal. juin

- 1998;2(2):101-19.
22. DOMBRE E. Introduction to Surgical Robotics. 2nd Summer School in Surgical Robotics; 2005 sept; Montpellier.
 23. Wolf A, Shoham M. Medical Automation and Robotics. Springer Handb Autom. 2009;1397-407.
 24. Devito DP, Kaplan L, Dietl R, Pfeiffer M, Horne D, Silberstein B, et al. Clinical Acceptance and Accuracy Assessment of Spinal Implants Guided With SpineAssist Surgical Robot: Retrospective Study. *Spine*. nov 2010;35(24):2109.
 25. Díaz CE, Fernández R, Armada M, García Gutiérrez F de J. State of the art in robots used in minimally invasive surgeries. Natural Orifice Transluminal Surgery (NOTES) as a particular case. *Ind Robot Int J*. 19 oct 2015;42(6):508-32.
 26. Divi S, Pollster S, Ramos E, Lee MJ. The Current Role of Robotic Technology in Spine Surgery. *Oper Tech Orthop*. 1 déc 2017;27(4):275-82.
 27. Hernandez D, Garimella R, Ektorai AEM, Daniels AH. Computer-assisted Orthopaedic Surgery. *Orthop Surg*. 2017;9(2):152-8.
 28. Gomes P. Medical Robotics: Minimally Invasive Surgery. Elsevier; 2012. 326 p.
 29. David. Global Electromagnetic Surgical Navigation System Market [Internet]. Long Short Report. 2016 [consulté le 20 juill 2018]. Disponible sur: <https://longshortreport.com/2016/11/09/global-electromagnetic-surgical-navigation-system-market-2016-2021/>
 30. Britton D. Autonomous Surgical Robots [Internet]. Rochester, NY: Social Science Research Network; 2016 mai [consulté le 18 juill 2018]. Report No.: ID 2977943. Disponible sur: <https://papers.ssrn.com/abstract=2977943>
 31. Robot dentist is first to fit implants without a human touch [Internet]. South China Morning Post. 2017 [consulté le 18 juill 2018]. Disponible sur: <https://www.scmp.com/news/china/article/2112197/chinese-robot-dentist-first-fit-implants-patients-mouth-without-any-human>
 32. Shademan A, Decker R, Opfermann JD, Leonard S, Krieger A, Kim PCW. Supervised autonomous robotic soft tissue surgery. *Sci Transl Med*. 04 2016;8(337):337ra64.
 33. Guillemin F. La chirurgie robotique. *Oncologie*. 1 mai 2016;18(5):275-6.
 34. Vercruyssen M, Laleman I, Jacobs R, Quirynen M. Computer-supported implant planning and guided surgery: a narrative review. *Clin Oral Implants Res*. sept 2015;26(S11):69-76.
 35. Colombo M, Mangano C, Mijiritsky E, Krebs M, Hauschild U, Fortin T. Clinical applications and effectiveness of guided implant surgery: a critical review based on randomized controlled trials. *BMC Oral Health*. 13 déc 2017;17:150.
 36. Su C-Y, Fu J-H, Wang H-L. The Role of Implant Position on Long-Term Success. *Clin Adv Periodontics*. août 2014;4(3):187-93.
 37. Yeshwante B, Baig N, Tambake SS, Tambake R, Patil V, Rathod R. MASTERING DENTAL IMPLANT PLACEMENT: A REVIEW. *J Appl Dent Med Sci*. 2017;3(2):220-7.
 38. Kim YK, Hwang JW, Lee HJ, Yeo IS, Yun PY. Influence of implant misplacement on the success of the final prosthesis: Subjective evaluation by a prosthodontist of dental implants placed by an oral and maxillofacial surgeon. *J Korean Assoc Oral Maxillofac Surg*. 1 déc 2009;35(6):437-41.
 39. Froum S. Dental Implant Complications: Etiology, Prevention, and Treatment. John Wiley & Sons; 2015. 736 p.
 40. Buser D, Martin W, Belser UC. Optimizing esthetics for implant restorations in the anterior maxilla: anatomic and surgical considerations. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2004;19 Suppl:43-61.
 41. Al-Sabbagh M. Implants in the esthetic zone. *Dent Clin North Am*. juill 2006;50(3):391-407, vi.
 42. Tahmaseb A, Wismeijer D, Coucke W, Derksen W. Computer technology applications

- in surgical implant dentistry: a systematic review. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2014;29 Suppl:25-42.
43. Sun T-M, Lan T-H, Pan C-Y, Lee H-E. Dental implant navigation system guide the surgery future. *Kaohsiung J Med Sci*. janv 2018;34(1):56-64.
 44. Haidar ZS. Autonomous Robotics: A fresh Era of Implant Dentistry... is a reality! *J Oral Res*. 2017;6(9):230–231.
 45. WISMEIJER, D., BUSER, D., et BELSER, U. *ITI Treatment Guide, Vol 4: Loading Protocols in Implant Dentistry*. Berlin: Quintessence. 2010.
 46. Davarpanah K, Demurashvili G, Daas M, Rajzbaum P, Capelle-Ouadah N, Szmukler-Moncler S, et al. Implantologie assistée par ordinateur. *Rev Stomatol Chir Maxillofac*. 1 sept 2012;113(4):259-75.
 47. D'Souza KM, Aras MA. Types of Implant Surgical Guides in Dentistry: A Review. *J Oral Implantol*. 9 sept 2011;38(5):643-52.
 48. Implants dentaires au Centre Schneck [Internet]. [consulté le 28 févr 2018]. Disponible sur: <http://www.centreschneck.fr/activites-chirurgicales/implants-dentaires.html>
 49. Products - Surgical Stents [Internet]. [consulté le 28 févr 2018]. Disponible sur: <http://www.studio32dental.com/surgicalstent.html>
 50. Block MS, Emery RW. Static or Dynamic Navigation for Implant Placement—Choosing the Method of Guidance. *J Oral Maxillofac Surg*. 1 févr 2016;74(2):269-77.
 51. Guide chirurgical [Internet]. [consulté le 11 sept 2018]. Disponible sur: https://canaray.com/canaray/static/guided_surgery/index.html
 52. Block MS, Emery RW, Lank K, Ryan J. Implant Placement Accuracy Using Dynamic Navigation. *Int J Oral Maxillofac Implants*. févr 2017;32(1):92-9.
 53. X-Guide implant navigation course Archives [Internet]. X-Nav Technologies. [consulté le 27 févr 2018]. Disponible sur: <http://www.x-navtech.com/blog/tag/x-guide-implant-navigation-course/>
 54. Taraschi V. Patient specific 3D finite element modelling, analysis and verification of dental implant navigation and insertion system [Internet] [Thesis]. 2016 [consulté le 16 juin 2018]. Disponible sur: <https://opus.lib.uts.edu.au/handle/10453/90041>
 55. Société française d'oto-rhino-laryngologie et de chirurgie de la face et du cou, International Federation of Oto-Rhino-Laryngological Societies. *Robotics and digital guidance in ENT-H&N surgery*. Lombard B, Céruse P, éditeurs. Issy-les-Moulineaux, France: Elsevier Masson; 2017. xix+264.
 56. Precision Surgery [Internet]. [consulté le 16 juin 2018]. Disponible sur: http://www.grasshopper-hosting.co.uk/POS/04%20What%20we%20do/Knee_Replacement_Acrobot.html
 57. Tregouët Y-M. Intérêt clinique de la navigation implantaire dynamique: le point sur la littérature [Thèse d'exercice]. [France]: Université de Nantes. Unité de Formation et de Recherche d'Odontologie; 2018.
 58. Strong EB, Rafii A, Holhweg-Majert B, Fuller SC, Metzger MC. Comparison of 3 optical navigation systems for computer-aided maxillofacial surgery. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg*. oct 2008;134(10):1080-4.
 59. DiGioia A, Jaramaz B, Picard F, Nolte L-P. *Computer and Robotic Assisted Hip and Knee Surgery*. OUP Oxford; 2004. 366 p.
 60. Armand S, Legac O. intérêts de la robotique passive système robodent®. 2009;20:14.
 61. Emery RW. *Dynamic Image Navigation for Dental Implants*. 2016 mars; Washington DC.
 62. Eggers G. Image-Guided Surgical Navigation. In: *Maxillofacial Cone Beam Computed Tomography* [Internet]. Springer, Cham; 2018 [consulté le 2 juill 2018]. p. 1037-55. Disponible sur: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-62061-9_26
 63. Luebbbers H-T, Messmer P, Obwegeser JA, Zwahlen RA, Kikinis R, Graetz KW, et al. Comparison of different registration methods for surgical navigation in cranio-maxillofacial

- surgery. *J Cranio-Maxillo-fac Surg Off Publ Eur Assoc Cranio-Maxillo-fac Surg.* mars 2008;36(2):109-16.
64. David Burgess. Navident workflow for dynamic navigation [Internet]. [consulté le 7 nov 2018]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=UcNRL4kjI7w>
65. Incredible footage shows a robot fitting dental implants [Internet]. Mail Online. 2017 [consulté le 28 août 2018]. Disponible sur: <http://www.dailymail.co.uk/~-/article-4910326/index.html>
66. Le domaine mondial des robots médicaux Secret 2017 est l'un des dix meilleurs moments [Internet]. [consulté le 11 sept 2018]. Disponible sur: <https://xw.qq.com/cmsid/20180208A054IV00>
67. La Chine a mis au point le premier robot implantaire entièrement automatique au monde, qui a dépassé les États-Unis! [Internet]. [consulté le 11 sept 2018]. Disponible sur: <http://wemedia.ifeng.com/47296007/wemedia.shtml>
68. Tolstunov L. *Horizontal Alveolar Ridge Augmentation in Implant Dentistry: A Surgical Manual.* John Wiley & Sons Limited; 2016. 907 p.
69. Legac O. Chirurgie assistée par ordinateur la navigation dynamique système x-guide [Internet]. LEFILDENTAIRE magazine dentaire. 2018 [consulté le 15 juin 2018]. Disponible sur: <https://www.lefildentaire.com/articles/clinique/implantologie/chirurgie-assistee-par-ordinateur-la-navigation-dynamique-systeme-x-guide/>
70. Emery RW, Merritt SA, Lank K, Gibbs JD. Accuracy of Dynamic Navigation for Dental Implant Placement-Model-Based Evaluation. *J Oral Implantol.* oct 2016;42(5):399-405.
71. Witherington T, Cheung A, Nagy L, Brewer L. Enhanced Implant Case Planning Using Dual Scan CBCT of an Existing Prosthesis: Report of a Case. *J Oral Implantol.* oct 2017;43(5):381-6.
72. Oral Arts Dental Laboratories - Huntsville, AL [Internet]. Oral Arts Dental Laboratories - Huntsville, AL. [consulté le 13 nov 2018]. Disponible sur: <http://www.oralartsdental.com/>
73. Kang B-G, Kim H-J, Chung C-H. Accuracy of the CT guided implant template by using an intraoral scanner according to the edentulous distance. *J Korean Acad Prosthodont.* 1 janv 2017;55(1):1-8.
74. Farley NE, Kennedy K, McGlumphy EA, Clelland NL. Split-Mouth Comparison of the Accuracy of Computer-Generated and Conventional Surgical Guides. *Int J Oral Maxillofac Implants.* mars 2013;28(2):563-72.
75. Vercruyssen M, Cox C, Coucke W, Naert I, Jacobs R, Quirynen M. A randomized clinical trial comparing guided implant surgery (bone- or mucosa-supported) with mental navigation or the use of a pilot-drill template. *J Clin Periodontol.* juill 2014;41(7):717-23.
76. Shen P, Zhao J, Fan L, Qiu H, Xu W, Wang Y, et al. Accuracy evaluation of computer-designed surgical guide template in oral implantology. *J Cranio-Maxillo-fac Surg Off Publ Eur Assoc Cranio-Maxillo-fac Surg.* déc 2015;43(10):2189-94.
77. Arisan V, Karabuda CZ, Ozdemir T. Implant surgery using bone- and mucosa-supported stereolithographic guides in totally edentulous jaws: surgical and post-operative outcomes of computer-aided vs. standard techniques. *Clin Oral Implants Res.* sept 2010;21(9):980-8.
78. Fontão FNGK, Luiz J, Freitas RM, Padovan LEM, Thomé G, Faot F. Real vs. virtual position of single implants installed in pre-maxilla via guided surgery: A proof of concept analyzing positional deviations. *J Oral Implantol.* 16 juill 2018;
79. Barrak I, Joób-Fancsaly A, Varga E, Boa K, Piffko J. Effect of the Combination of Low-Speed Drilling and Cooled Irrigation Fluid on Intraosseous Heat Generation During Guided Surgical Implant Site Preparation: An In Vitro Study. *Implant Dent.* août 2017;26(4):541-6.
80. Liu Y-F, Wu J-L, Zhang J-X, Peng W, Liao W-Q. Numerical and Experimental Analyses on the Temperature Distribution in the Dental Implant Preparation Area when Using a Surgical Guide. *J Prosthodont Off J Am Coll Prosthodont.* janv 2018;27(1):42-51.
81. Mishra SK, Chowdhary R. Heat generated by dental implant drills during osteotomy-a review: heat generated by dental implant drills. *J Indian Prosthodont Soc.* juin

2014;14(2):131-43.

82. Sociétés de dispositifs médicaux | Technologie médicale | Zimmer Biomet [Internet]. [consulté le 14 sept 2018]. Disponible sur: <http://www.zimmer-biomet.fr/>
83. Koop R, Vercruyssen M, Vermeulen K, Quirynen M. Tolerance within the sleeve inserts of different surgical guides for guided implant surgery. *Clin Oral Implants Res.* juin 2013;24(6):630-4.
84. Messas Kahn A. Le guide chirurgical: indications et limites [Thèse d'exercice]. [2009-...., France]: Université de Strasbourg; 2018.
85. Sociétés de dispositifs médicaux | Technologie médicale | Nobel Biocare [Internet]. [consulté le 17 févr 2019]. Disponible sur: <http://store.nobelbiocare.com/be/fr/branemark-systemr-guided-surgery-kit>
86. Larripa M. Guide chirurgical implantaire par stéréolithographie: planification numérique par le logiciel Blue Sky Plan® et impression 3D au cabinet dentaire [Thèse d'exercice]. Université de Bordeaux; 2018.
87. Chiu W-K, Luk W-K, Cheung L-K. Three-dimensional accuracy of implant placement in a computer-assisted navigation system. *Int J Oral Maxillofac Implants.* juin 2006;21(3):465-70.
88. Kramer F-J, Baethge C, Swennen G, Rosahl S. Navigated vs. conventional implant insertion for maxillary single tooth replacement. *Clin Oral Implants Res.* févr 2005;16(1):60-8.
89. Brief J, Edinger D, Hassfeld S, Eggers G. Accuracy of image-guided implantology. *Clin Oral Implants Res.* août 2005;16(4):495-501.
90. Casap N, Wexler A, Persky N, Schneider A, Lustmann J. Navigation surgery for dental implants: Assessment of accuracy of the image guided implantology system. *J Oral Maxillofac Surg.* 1 sept 2004;62(Supplement 2):116-9.
91. Chen C-K, Yuh D-Y, Huang R-Y, Fu E, Tsai C-F, Chiang C-Y. Accuracy of Implant Placement with a Navigation System, a Laboratory Guide, and Freehand Drilling. *Int J Oral Maxillofac Implants.* déc 2018;33(6):1213-8.
92. Kownacki P, Morawiec T, Niedzielska I, Nawrat Z, Rój R, Baron S. Case Report: The Clinical Application of a Surgical Navigation System for Implant-Prosthetic Rehabilitation of the Patient with Maxillary Lateral Incisors Agenesis. *J Clin Case Rep [Internet].* 6 nov 2015 [consulté le 4 mars 2018];5(11). Disponible sur: <https://www.omicsonline.org/open-access/case-report-the-clinical-application-of-a-surgical-navigation-system-for-implantprosthetic-rehabilitation-of-the-patient-with-maxil-2165-7920-1000650.php?aid=65557>
93. Block MS, Emery RW, Cullum DR, Sheikh A. Implant Placement Is More Accurate Using Dynamic Navigation. *J Oral Maxillofac Surg.* 1 juill 2017;75(7):1377-86.
94. Kasten B, Arastu A, Panchal N. Dental Implant Surgery: From Conventional to Guided to Navigated Approach. *Curr Oral Health Rep.* 1 juin 2018;5(2):140-6.
95. D'haese J, Ackhurst J, Wismeijer D, De Bruyn H, Tahmaseb A. Current state of the art of computer-guided implant surgery. *Periodontol 2000.* 1 févr 2017;73(1):121-33.
96. Gopinadh A, Devi KNN, Chiramana S, Manne P, Sampath A, Babu MS. Ergonomics and musculoskeletal disorder: as an occupational hazard in dentistry. *J Contemp Dent Pract.* 1 mars 2013;14(2):299-303.
97. Emery RW, Korj O, Agarwal R. A Review of In-Office Dynamic Image Navigation for Extraction of Complex Mandibular Third Molars. *J Oral Maxillofac Surg Off J Am Assoc Oral Maxillofac Surg.* août 2017;75(8):1591-600.
98. Ma L, Jiang W, Zhang B, Qu X, Ning G, Zhang X, et al. Augmented reality surgical navigation with accurate CBCT-patient registration for dental implant placement. *Med Biol Eng Comput.* 2 juill 2018;
99. Somogyi-Ganss E, Holmes HI, Jokstad A. Accuracy of a novel prototype dynamic computer-assisted surgery system. *Clin Oral Implants Res.* 1 août 2015;26(8):882-90.
100. Block MS. Treatment Planning and Perioperative Management of the Dental Implant

- Patient. In: Ferneini EM, Bennett JD, éditeurs. Perioperative Assessment of the Maxillofacial Surgery Patient: Problem-based Patient Management. Cham: Springer International Publishing; 2018. p. 433-54.
101. Jokstad A, Winnett B, Fava J, Powell D, Somogyi-Ganss E. Investigational Clinical Trial of a Prototype Optoelectronic Computer-Aided Navigation Device for Dental Implant Surgery. *Int J Oral Maxillofac Implants*. juin 2018;33(3):679-92.
102. Ganz DSD. 3-D virtual planning concepts for implant-retained full-arch mandibular prostheses. *Int Mag Cone Beam Dent*. 2014;(3):6.
103. Vercruyssen M, Fortin T, Widmann G, Jacobs R, Quirynen M. Different techniques of static/dynamic guided implant surgery: modalities and indications. *Periodontol 2000*. oct 2014;66(1):214-27.
104. André M. Limitation de l'ouverture buccale : étiologies, diagnostiquer le caractère transitoire ou permanent, conduite à tenir [Internet] [Thèse de doctorat]. Université de Lorraine; 2012 [consulté le 15 nov 2018]. Disponible sur: <https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01739021/document>
105. Tremblay G. Bone Reduction Guide, Virtual Extractions and Stereolithographic Working Model [Internet]. Oral Health Group. 2013 [consulté le 15 nov 2018]. Disponible sur: <https://www.oralhealthgroup.com/features/bone-reduction-guide-virtual-extractions-and-stereolithographic-working-model/>
106. Ferneini EM, Bennett JD. Perioperative Assessment of the Maxillofacial Surgery Patient: Problem-based Patient Management. Springer; 2018. 702 p.

Annexes

Annexe 1 : Cas de chirurgie guidée d'une réduction de crête osseuse (102)

special | 3-D planning for implants

ARTICOLO
IN LINGUA
ORIGINALE

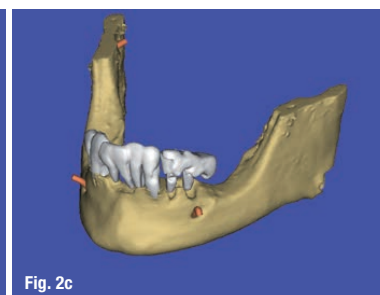
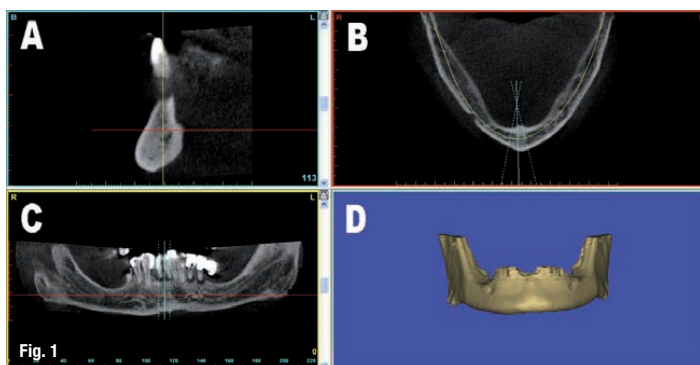
The bone reduction guide

3-D virtual planning concepts for implant-retained full-arch mandibular prostheses

Author_Dr Scott D. Ganz, USA

The process of accumulating patient information to determine which course of dental implant treatment should be considered can be described under the category of pre-surgical prosthetic planning. The first step in patient evaluation involves conventional periapical radiographs, panoramic radiographs, oral examination, and mounted, articulated study casts. These conventional tools allow the clinician to assess several important aspects of the patient's anatomical presentation, including vertical di-

mension of occlusion, lip support, phonetics, smile line, overjet, overbite, and ridge contours, and to obtain a basic understanding of the underlying bone structures. The accumulation of preliminary data afforded by conventional diagnostics provides the foundation for preparing a course of treatment for the patient. However, the review of findings is based upon a 2-D assessment of the patient's bone anatomy and may not be accurate in the appreciation of the spatial positioning of other vital structures, such as the incisive canal, the inferior alveolar nerve, or the maxillary sinus. In order to understand each individual patient's presentation fully, it is essential that clinicians adopt an innovative set of virtual 3-D tools. Through the use of advanced imaging modalities, new paradigms have been established that, in the author's opinion, will continue to redefine the process of diagnosis and treatment planning for dental implant procedures for years to come. Without the application of computed tomography (CT) or lower radiation dosage cone beam computed tomography (CBCT), an understanding of the 3-D anatomical reality cannot be accurately determined, potentially increasing



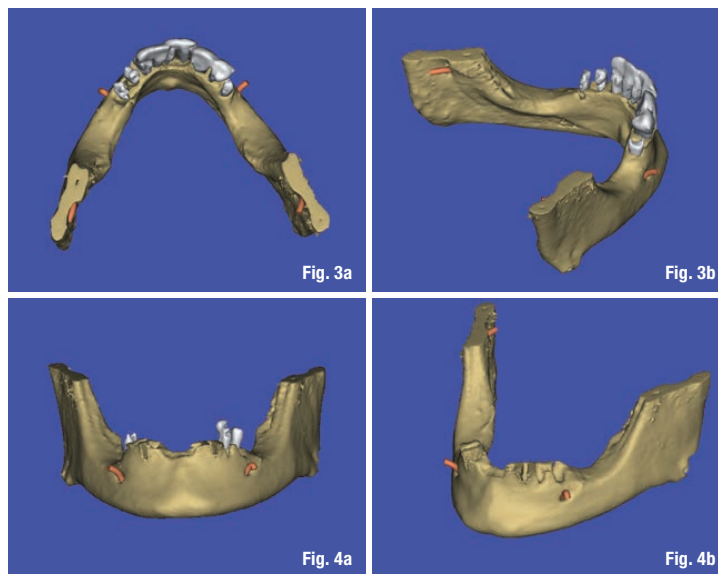
surgical and restorative complications.

The utilisation of 3-D imaging modalities as part of pre-surgical prosthetic planning can take several paths as demonstrated in the flow chart. The first involves acquiring a 3-D scan directly, without any prior planning or ancillary appliances. The scan process can be accomplished at a local radiology centre or via an in-office CBCT machine, now widely available. The scan itself can be completed within several minutes. Once the data has been processed, it can be viewed via the native software of the CBCT machine used and evaluated for potential implant recipient sites, followed by the surgical intervention. A second path requires the fabrication of a radiopaque scannographic appliance that incorporates vital restorative information and will be worn by the patient during the acquisition of the scan. In this manner, the tooth position can be evaluated in relation to the underlying bone and other important anatomical structures, such as the maxillary sinus or the inferior alveolar nerve. The scan data can again be visualised via the CBCT machine's native software and a plan can be determined based directly upon the restorative needs of the patient.

The scan data is formatted into a non-proprietary data interchange protocol referred to as DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine). The DICOM data can be exported for use in third-party software applications that incorporate additional tools to aid clinicians in the diagnosis and treatment planning functions.

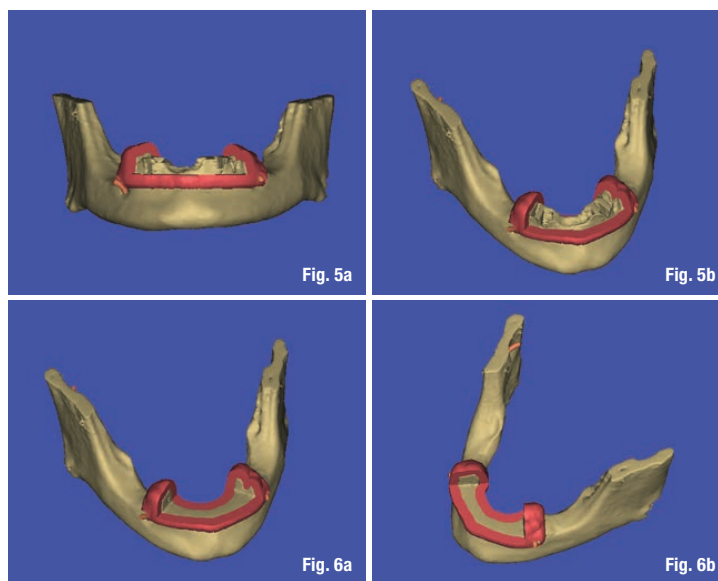
The use of interactive treatment planning has expanded dramatically in the past ten years as computing power has increased exponentially. There are at least two paths that can be taken once a virtual plan has been established. The first allows the data to be assessed, providing important information to the clinician who will perform the surgical intervention free-hand based upon the software plan.

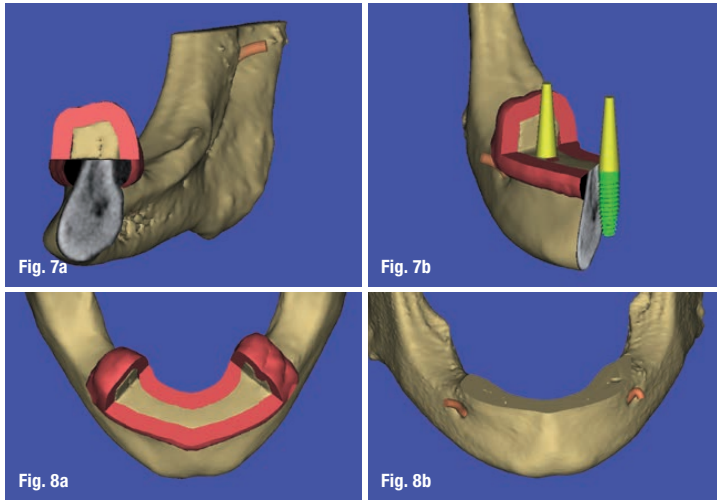
This has been termed CT-assisted intervention by the author. The second path involves the fabrication of a surgical guide or template that is re-motely constructed from the digital plan usually through rapid prototyping or stereolithography. This method has been described as CT-derived template-assisted intervention and is considered to be more predictable than any previous methods. The use of advanced imaging modalities for pre-surgical prosthetic planning is essential for any type of implant surgical and restorative intervention, including single-tooth and multiple-tooth restoration, full-arch fixed and removable overdenture reconstruction.



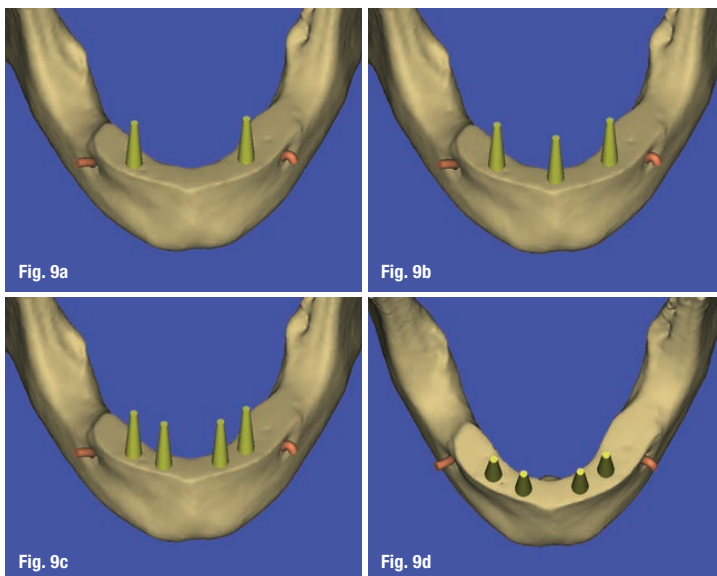
3-D planning concepts for the mandible

Regardless of the image acquisition process, there are four standard views that need to be fully appreciated in the diagnosis phase. These include the cross-sectional (A), the axial (B), the panoramic (C), and the 3-D reconstructed volume (D) as seen in Figure 1. The ability to interact within these images differs from software to software. It is the ability to visualise 3-D data with improved tools that empowers clinicians to assess individual patient anatomy. The cross-sectional slice is important for the assessment of





the facial and lingual cortical bone plates, the intramedullary bone, and the positioning of teeth within the alveoli. The axial view allows inspection of the entire upper or lower jaw, the maxillary sinus volume, the position of the incisive canal in the maxillae, and the mental foramina in the mandible. The panoramic view is an overall scout image, and can be helpful in tracing the mandibular nerve, and assessment of the maxillary sinus floor near the nose region. The 3-D reconstructed volumes are invaluable in the planning process and in communicating information to the members of the implant team, including the patient and the dental laboratory technician who will fabricate the final prosthesis. These images are especially useful, as they are most readily un-

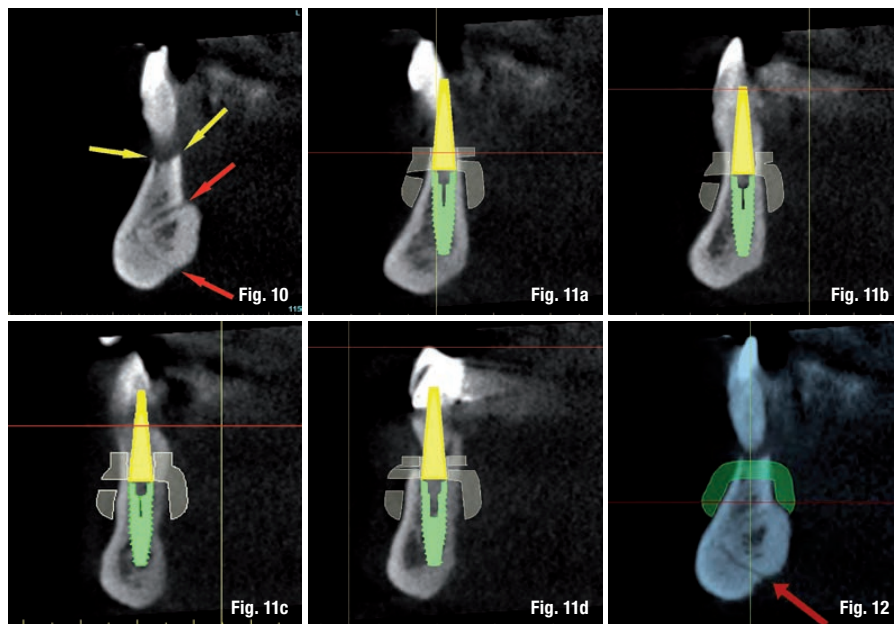


derstood and appreciated.

As represented in the flow chart, a patient may be sent to a radiology centre for a CBCT scan of the mandibular arch without a scanning appliance. The 3-D reconstructed volumes are easily understood and interpreted for the mandible (Figs. 2a–c). In the case demonstrated, there were several hopeless anterior teeth that were planned for extraction. The extent of the bone loss can be appreciated by the clinician and demonstrated to the patient as an excellent educational and communication tool. The virtual mandible can be rotated to reveal all views of the patient’s individual anatomical presentation (Figs. 3a & b). With innovative software tools, the teeth can be virtually extracted in the 3-D reconstructed volume, aiding the clinician in understanding the local anatomy to identify potential implant recipient sites (Figs. 4a & b). In this example, the alveolar ridge narrowed considerably at the crest. In order to facilitate implant placement, the ridge required an alveolectomy, reducing the ridge by approximately 8–10 mm.

Advanced software applications allow for the bone to be sectioned based upon the desired plan. A bone reduction template pioneered by the author can be simulated by the software and then fabricated to assist in the bone removal (Figs. 5a & b). The reduction template fits over the ridge, allowing complete visualisation of the residual bone to be sectioned from the alveolar ridge. The flattened ridge can also be simulated, greatly enhancing the clinician’s appreciation of the remaining bone topography (Figs. 6a & b). The amount of bone to be removed can be visualised as shown in Figure 7a and then assessed with realistic manufacturer-specific implant placement in the bone (Fig. 7b). The occlusal and facial views reveal the new width of available crestal bone for implant placement (Figs. 8a & b). The visualisation of the bone crest can aid in the determination of ideal implant recipient sites. However, it must be noted that all other views must be considered to appreciate adjacent vital anatomical structures and the remaining topography of the anterior mandible before any plan can be finalised. Several different options can be quickly simulated and then discussed with the patient and all members of the implant team. The use of a bone reduction template can facilitate the accurate removal of bone and the immediate placement of implants, eliminating the need for two separate surgical interventions and thus minimising patient morbidity.

The initial plan in the case demonstrated was for the patient to receive an implant-retained overdenture. Therefore, recipient sites were de-



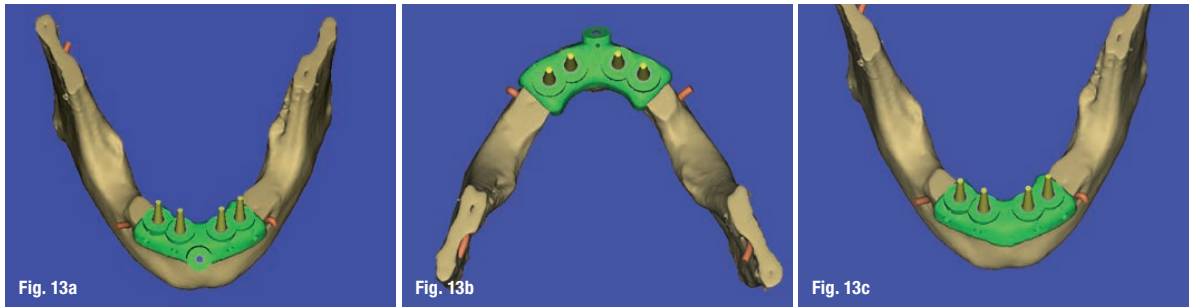
terminated based upon the available bone in the mandibular symphysis between the right and left mental foramina, which were assessed in the axial and cross-sectional views. While it is possible to fabricate an overdenture design with implants in the posterior region of the mandible, the usual position of implants is within the symphysis region. The choices were to place two implants, three implants, or four implants between the two mental foramina (Figs. 9a–d). The symphysis area is not free from risk. A cross-sectional view is necessary for an appreciation of the thickness of the facial and lingual cortical bone plates, and for assessment of the trajectory and topography of the anterior mandible. In addition, there are important vessels in the region that have been shown to cause severe haemorrhaging if perforated. These vessels may differ from patient to patient and underscore the importance of a 3-D diagnosis.

In this case, two such vessels were found in the midline area of the symphysis (red arrows) as seen in the cross-sectional view, which also revealed the extensive bone loss surrounding the hopeless teeth (yellow areas; Fig. 10).

Virtual realistic implants were simulated in the residual alveolar bone (Figs. 11a–d). A simulated surgical template was fabricated for the desired implant positions and rested on the reduced bone both facially and lingually. At the midline, where the vital vessels resided, it was elected not to place an implant to avoid potential surgical complications (Fig. 12). The simulated bone-borne surgical template was visualised in

various 3-D reconstructed volumes (Figs. 13a–c). The first two revealed a midline horizontal stabilisation screw (Figs. 13a & b) and the last showed a standard bone-borne template without fixation (Fig. 13c). Had additional implants been required for improved stability or had a fixed detachable hybrid restoration been indicated, supplementary recipient sites could have been located based upon the available anatomy.

In order to demonstrate the capabilities of the new digital paradigms, five virtual implants were placed into the initial anterior alveolar ridge after the teeth had been extracted virtually (Fig. 14a). The positions of implants can be further enhanced by placing yellow abutment projections that extend above the occlusal plane. Using selective transparency, the various structures can be adjusted in opacity and translucency. Using advanced software simulation, horizontal osteotomies to allow the implants to be placed in the same vertical position in the newly reduced ridge were illustrated (Fig. 14b). Implant-to-implant relationships can be evaluated in all dimensions (Figs. 15a & b). In addition, it is important to provide ample clearance between the most posterior implants and the inferior alveolar nerve and mental foramen. Once the positions of the implants have been finalised, a surgical guide can be simulated (Figs. 16a & b). Note that the implants were all parallel, which can aid in laboratory fabrication for overdentures and in achieving passive fit for fixed frameworks (Fig. 16c). The relationship between the original tooth position and the simulated implants can be

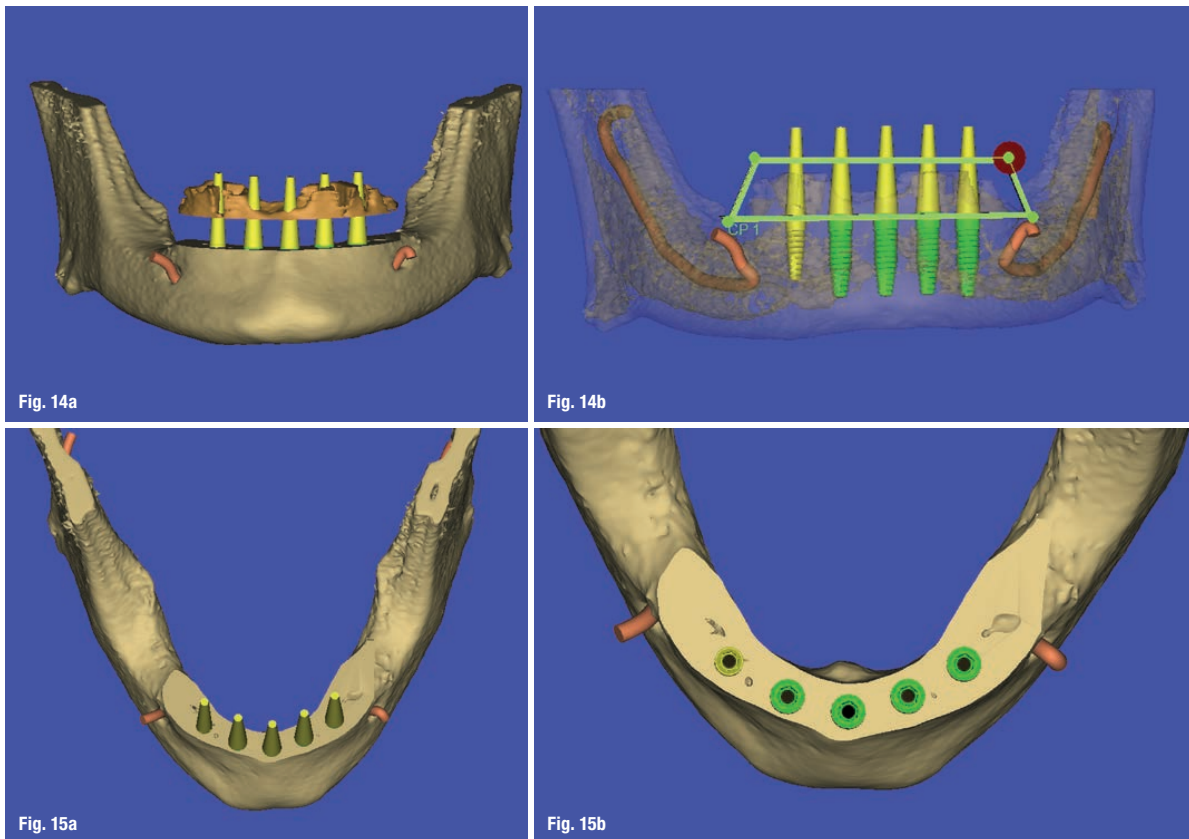


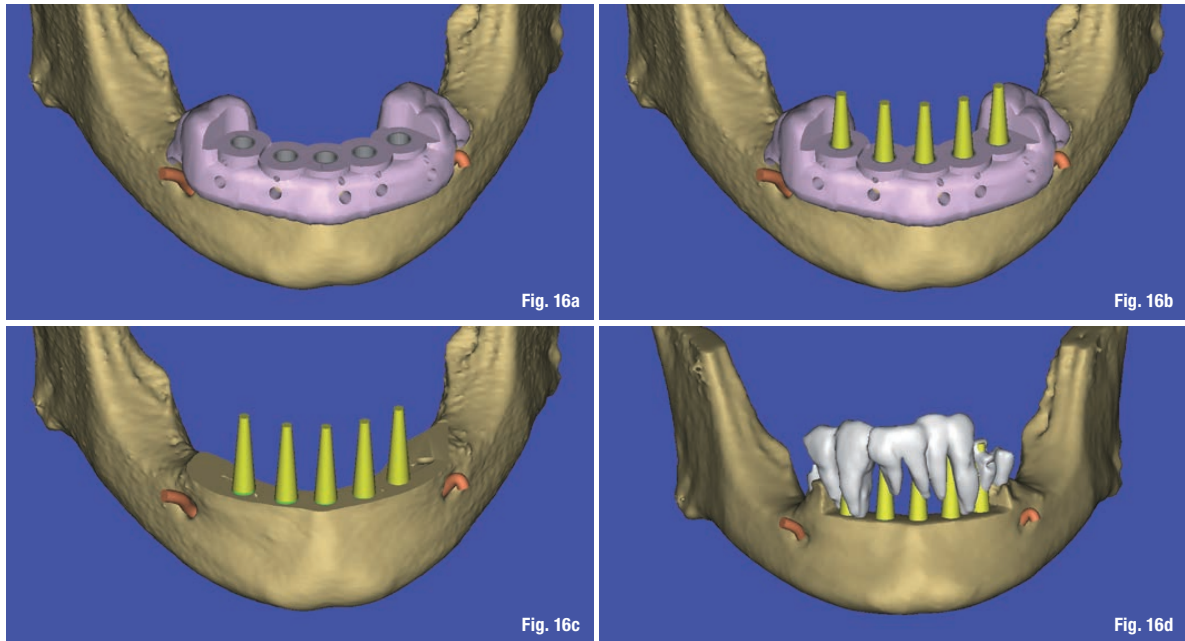
appreciated in Figure 16d. If a fixed detachable hybrid, full-arch CAD/CAM zirconia restoration, or an immediate restorative protocol is desired, the ability to simulate implant position with an accurate consideration of the desired tooth position will enhance the surgical, restorative and laboratory phases of treatment.

Conclusion

The advent of complete denture fabrication has evolved into the adoption of overdenture concepts for both natural and implant-retained restorations. Conventional prosthodontic proto-

cols have been developed to aid in the diagnosis, treatment planning and laboratory phases of the reconstruction. These include conventional peri-apical radiographs, panoramic radiographs, oral examination, and mounted, articulated study casts. Using these, the clinician can assess several important aspects of the patient's anatomical presentation, including vertical dimension of occlusion, lip support, phonetics, smile line, overjet, overbite, and ridge contours, and can obtain a basic understanding of the underlying bone structures. The accumulation of preliminary data afforded by conventional diagnostics provides the foundation for preparing a course





of treatment for the patient. However, the review of findings is based upon a 2-D assessment of the patient's bone anatomy.

In order to understand each patient's presentation fully, advanced 3-D imaging modalities are essential. This article has illustrated the use of various innovative virtual 3-D tools.

The application of CT or lower radiation dosage CBCT provides clinicians with an accurate understanding of the 3-D anatomical reality of our patients as an aid in providing state-of-the-art treatment. Implants will be better positioned, with fewer surgical and restorative complications, and reduced laboratory remakes based upon these diagnostic tools. The benefits will enable clinicians to better understand the relationship between patient anatomy and the desired restorative outcomes in the process of achieving true restoratively driven implant reconstruction. The ability to utilise digital imaging and treatment planning technology is now within the reach of many clinicians through the various software products on the market. In addition, there are many third-party outlets online that enable clinicians to upload their DICOM data for evaluation, processing, treatment planning, and even surgical template fabrication.

In many case presentations, a reduction of the alveolar crest is an essential part of the surgical phase to achieve adequate width of the bone for implant placement.

It is now possible to plan for accurate bone

reduction with the full knowledge of the impact on the inter-arch space and occlusal requirements. The advent of the bone reduction template provides one additional digital solution that can also result in reduced patient morbidity, especially when the process can be completed in one surgical procedure. New paradigms have been established that, in the author's opinion, will continue to redefine the process of diagnosis and treatment planning for dental implant procedures, both removable and fixed implant-retained alternatives, for years to come.

L'articolo è stato pubblicato la prima volta su Cone Beam International, n. 3 - 2014.

_ about the author

implants



Dr Scott D. Ganz, maintains a private practice for prosthodontics, maxillofacial prosthetics and implant dentistry in Fort Lee in New Jersey in the US. He appears in the Best Dentists in America list by Woodward/White and in the Top Dentists list by the New Jersey Monthly. He has served as President of the New Jersey Section of the American College of Prosthodontists and of the Computer Aided Implantology Academy.

Dr Ganz delivers presentations worldwide on both the surgical and restorative phases of implant dentistry, and has published extensively on these topics. He is considered one of America's leading experts in the evolution of computer utilisation and interactive software for diagnostic and treatment planning applications using CT and newer- generation CBCT imaging modalities.

Annexe 2 : Cas de chirurgie guidée sur un patient édenté avec la réalisation préopératoire du bridge provisoire implanto-porté (106)

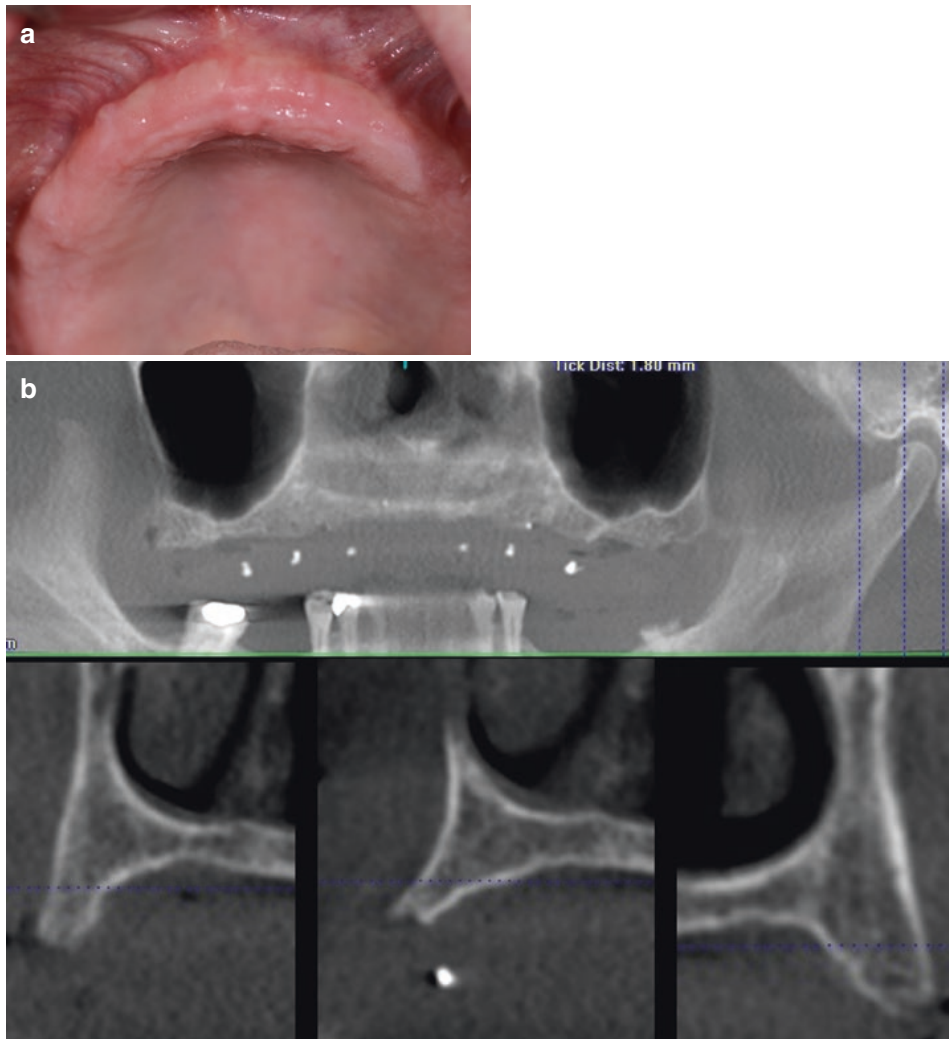


Fig. 31.5 (a) A patient edentulous in the maxilla for 10 years desires a set of teeth that do not have to be removed. He has funds for the implants placement and prosthetics but not for additional costs of an immediate fixed provisional. (b) A new denture was fabricated and used with fiducials for dual scan protocols. These images demonstrate adequate bone for a fixed provisional. (c) For a static guide, the image of the new denture was superimposed on the bone using planning software. Six implants are positioned within the bone. The anterior four can be paralleled to use straight emergence abutments. The posterior implants will require 30° angle correction abutments. (d) The view of the planned prosthesis with the implants. (e) The planning positioned the implants within the crowns of the teeth in order to minimize flange and allow for a prosthesis made of ceramics if the patient found this option financially acceptable. (f) This occlusal view shows the planned position of the implants to allow for a screw-retained prosthesis. (g) The planning software designs the surgical guide stent. This allows the surgeon to view its design prior to manufacture. (h) This is the surgical guide stent fabricated by the dual scan virtual method. (i) These views show implant analogs mounted to the cylinders within the guide stent. Stone can be poured

to provide a presurgical model for additional planning or provisional prosthesis conversion. (j) This is a stone model made from the implant analogs placed into the guide stent. This is available preoperatively to allow the restorative dentist visible confirmation of the plan. This model can be used to choose abutments, trim retentive coping, and convert a provisional prior to the surgical procedure. (k) This photo shows the surgical guide stent in position with the implants placed and pins securing the stent to the maxilla. (l) Implants have been placed and cover screws placed. This allows the patient to wear his denture during the healing period with minimal pressure placed on the implants. (m) Reconstructed panoramic image showing implants placed as planned. (n) This is the zirconia prosthesis immediately after milling. (o) Final prosthesis with staining for esthetics (laboratory work by Mr. Renzo Cassellini). (p) Occlusal view showing metal inserts to allow for metal-to-metal contact when screw retaining the prosthesis. (q) Occlusal view of prosthesis in mouth. (r) Photo showing appropriate soft tissue support and tooth show. (s) Frontal view of prosthesis in place with space for maintenance (Restorative dentist is Dr. Laurie Glaser)

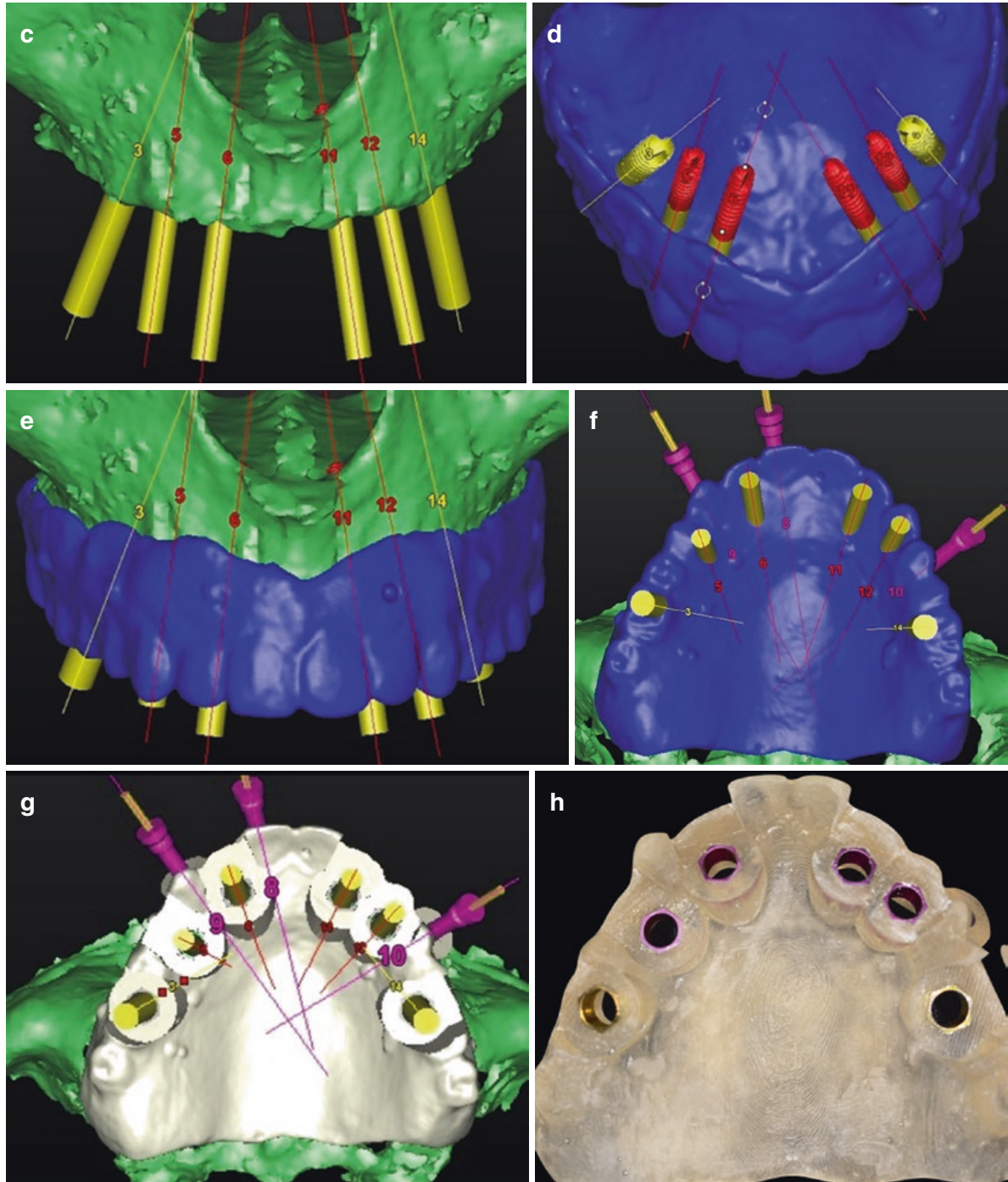


Fig. 31.5 (continued)

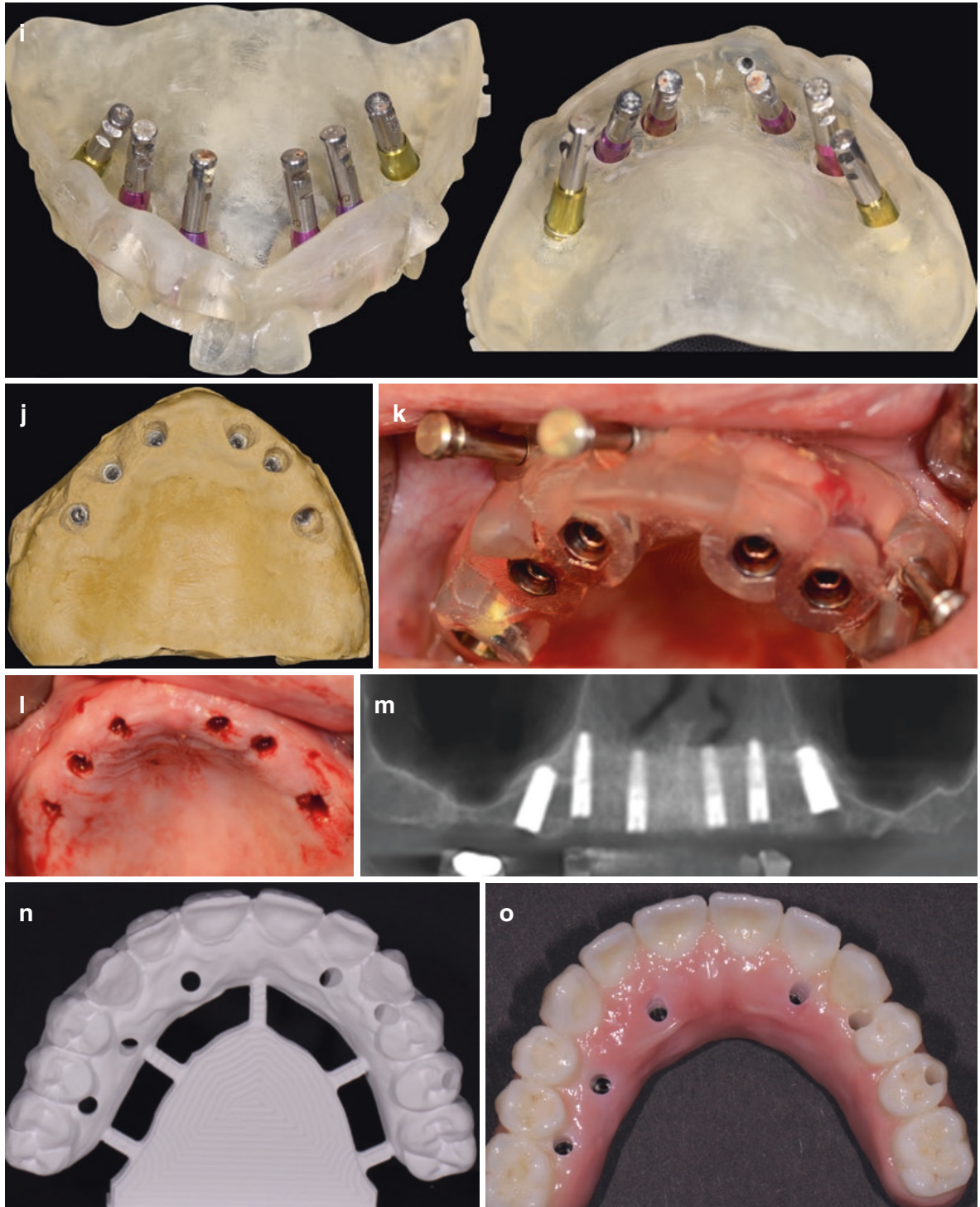


Fig. 31.5 (continued)



Fig. 31.5 (continued)

choice cannot be easily changed once the guide stent has been fabricated. During surgery, the implant placement position cannot be changed unless the surgeon abandons the use of the guide stent. The use of the static guide stent also limits the ability to irrigate the drill during the process since access is limited to the bone, with the potential for increased heat production [4].

The use of static guides is difficult when the patient has limited mouth opening or for placement in the second molar regions. This problem is most evident in the posterior region of the mouth or in selected patients who have limited interocclusal opening, such as scleroderma patients.

The advantages of using a static guide stent are the accurate implant placement, the use of flapless approach, the ability to use the guide stent to preoperatively fabricate fixed provisional restorations, and in general less invasive surgery which results in less patient morbidity.

31.4.2 Dynamic Navigation

Presently available dynamic navigation systems for dental implant placement use passive tracking arrays to track the patient and the handpiece and to display images onto a monitor [5, 6]. Passive systems reflect light emitted from a light source back to high-definition cameras.

Most dynamic navigation systems require the use of fiducials securely attached to the patient's arch during the CBCT (Fig. 31.6). The fiducials, typically three in a triangular pattern, are within a clip-type device that allows for the connection of an extraoral tracking array. A similar array is on the handpiece. At the time of surgery, the patient tracking array and the handpiece's array must be within line of site to the overhead cameras, with no interferences (Fig. 31.7).

During the preparation of the implant site, the normal drill sequence is used. The surgeon uses the navigation screen to guide drilling with mini-

Chirurgie guidée en implantologie orale : choisir entre le guide statique et la navigation dynamique - Revue systématique

Jeffroy K.¹, Nafash G.², Emery R.*

¹ Docteur en chirurgie dentaire, Université de Lille, France

² Docteur en chirurgie dentaire, PH des CSERD et Chargé d'enseignement Université de Lille, France

* Docteur en chirurgie dentaire, Université de l'Illinois, États-Unis

Résumé

Introduction : Cette revue systématique de la littérature s'intéresse aux techniques modernes de chirurgie guidée permettant l'assistance au positionnement peropératoire d'un implant dentaire. L'étude a pour objectif de déterminer les critères décisionnels conduisant le chirurgien à choisir entre le guide statique et la navigation dynamique.

Méthode : Pour réaliser ce travail, une recherche bibliographique systématique est réalisée à partir de la base de données MEDLINE (PubMed) afin d'identifier les articles traitant du guidage statique et/ou de la navigation dynamique. Pour être inclus dans l'étude, l'article devait présenter au moins un avantage et/ou un inconvénient et/ou une indication. Les études ont été sélectionnées après plusieurs étapes : lecture du titre, lecture du résumé et lecture intégrale pour les derniers résultats retenus. L'extraction des données a été effectuée à l'aide d'un formulaire pré-rempli.

Résultats et analyses : Le recueil des données a porté sur 24 articles sélectionnés. Les avantages, inconvénients et indications de chacune des deux techniques sont relevés et synthétisés. Une analyse confrontant les paramètres entre eux a permis d'établir un organigramme décisionnel entre la navigation dynamique et le guidage statique. La navigation dynamique a pour grand intérêt d'élargir le champ d'application de la chirurgie guidée, en permettant un guidage dans des situations où le guide statique n'est pas recommandé à savoir principalement : ouverture buccale limitée, secteur postérieur, faible espace interdentaire. Le guide statique conserve cependant certaines indications propres principalement chez le patient édenté ou dans le cadre d'un site anatomique irrégulier de type post-extractionnel.

Discussion : Certains paramètres relevés sont remis en question grâce à l'ensemble des données obtenues. La principale difficulté rencontrée dans la réalisation de la revue provient du manque de publications sur la navigation dynamique. Ainsi, revues narratives, opinions d'experts et essais cliniques de faible niveau de preuve scientifique font partie des articles sélectionnés. Les conclusions tirées doivent être approuvées par de futures études avec un niveau de preuve supérieur et un risque de biais maîtrisé.

Conclusion : Ce travail a permis de conclure que l'intérêt de la navigation dynamique en implantologie orale est une technique intéressante et éprouvée. Cette technique doit cependant être complémentaire avec le guide statique pour permettre au chirurgien de rester dans une approche guidée devant la plupart des situations cliniques qui s'offrent à lui.

Mots clés : Navigation dynamique, implant, dentaire

1. Introduction

La "transformation numérique" que l'on connaît actuellement a profondément impacté le monde de la chirurgie dentaire, notamment l'implantologie. Les progrès liés à l'imagerie tridimensionnelle et à l'assistance par ordinateur ont permis de concevoir des systèmes permettant de planifier la chirurgie de manière prédictible. Ainsi, depuis le début des années 2000, « l'implantologie guidée par la prothèse » devient progressivement un standard dans le traitement proposé au patient.

Aujourd'hui, de manière générale, pour positionner un implant dentaire le praticien utilise soit une approche dite « à main levée », soit un guide chirurgical élaboré à partir du modèle en plâtre. Ce guide, habituellement non limitant, permettra d'avoir seulement une approximation du point d'émergence implantaire lors de la chirurgie.

Cependant, avec les progrès technologiques, de plus en plus de chirurgiens effectuent leurs interventions à l'aide de guides limitants (« full guided ») conçus par conception et fabrication assistées par ordinateur (CFAO). Ces guides permettent d'obtenir une correspondance significativement plus précise entre la position de l'implant planifié et la position de l'implant en bouche. Mais, ils présentent encore de multiples inconvénients pouvant contre-indiquer leur utilisation et contraindre le praticien à revenir sur une approche non guidée, « à main levée ». En effet, encombrants, ils nécessitent une grande ouverture buccale et sont difficilement utilisables dans certains cas particulier. Actuellement, un autre système de chirurgie guidée gagne de plus en plus l'intérêt du monde médical : la navigation dynamique.

Utilisé depuis 1985, d'abord en neurochirurgie, puis ensuite à partir des années 2000 dans le domaine de l'implantologie, ce système passif permet de guider le chirurgien lors de la mise en place de l'implant. A la manière d'un système « GPS », des capteurs retransmettent en temps réel la position du foret et de l'implant par rapport au site opératoire, directement sur un écran de contrôle (Figure 1).

La dimension des appareils de suivi a été fortement diminuée pour les rendre plus praticables en cabinet. Dans la littérature, l'alternative de la navigation dynamique face au guide statique limitant n'est plus à prouver mis à part l'investissement initial. En effet, les études à propos de la précision des systèmes de guidage statique et de guidage par navigation sont de plus en plus nombreuses. Encore très récemment en décembre 2018, une publication de *Chen et al.* (1) a comparé la précision du positionnement de l'implant sous navigation dynamique par rapport au guide statique et à la technique à main levée (Tableau 1).

	Déviaton du centre (écart type)	Déviaton de l'apex (écart type)	Déviaton angulaire (écart type)
Main levée	1.44 mm (0.56)	2.00 mm (0.79)	9.26° (3.62)
Guide limitant	1.02 mm (0.46)	1.50 mm (0.79)	6.02° (3.71)
Navigation	1.07 mm (0.48)	1.35 mm (0.55)	4.45° (1.97)

Tableau 1 : Mesures relevées dans l'étude de Chen et al. (1)



Figure 1 : Installation du système de navigation X-Guide® (Courtoisie du Dr. Emery)

Cependant, chacune de ces deux approches guidées possède ses propres avantages et inconvénients dont le praticien doit avoir conscience pour respecter leurs indications cliniques. L'objectif de cette revue de littérature est de présenter cette technique peu connue des dentistes et d'étudier

comment le chirurgien doit orienter son choix entre une technique de guidage statique ou de guidage sous navigation dynamique afin de rester dans le cadre de la chirurgie guidée quel que soit la situation clinique.

Principe d'un système de navigation dynamique

Concrètement, une procédure sous navigation dynamique commence avec l'enregistrement des données tridimensionnelles (CBCT) du patient, porteur d'un repère radio-opaque placé sur l'arcade (Figure 2). Une fois que les caractéristiques (point d'entrée, axe, profondeur) du forage et de l'implant ont été définies lors de la planification, l'opérateur peut passer à l'étape de la chirurgie guidée.



Figure 2 : Repère radio-opaque (X-Clip® du système X-Guide®) seul, en bouche et sur le CBCT préopératoire (Courtoisie du Dr. Emery)

Il doit calibrer deux marqueurs : le marqueur-arcade attaché sur le repère radio-opaque et le marqueur-instrument fixé sur le contre-angle opératoire. Cette étape, capitale pour le suivi en temps réel, permet la virtualisation de l'instrument au sein du site opératoire.

Enfin, après une validation du système, la séquence de forage peut débuter. Le suivi de l'instrument est assuré par deux caméras placées au-dessus du champ opératoire. Ces caméras détectent les coordonnées spatiales de chaque élément suivi, en captant une lumière réfléchie par les marqueurs : c'est la localisation par stéréovision (Figure 3).

L'opérateur se concentre, tout au long de la chirurgie, sur l'écran de contrôle qui lui retransmet en direct un retour image de la position, de l'angle et de la profondeur du foret par rapport à la planification du CBCT préopératoire.

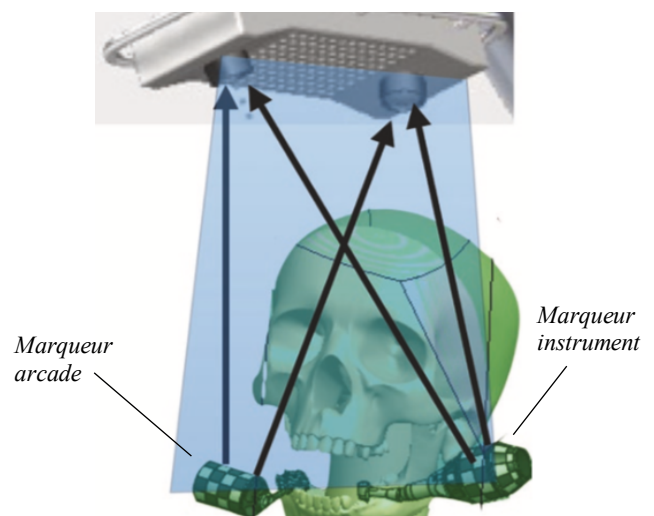


Figure 3 : La lumière émise par le sciatyctique est renvoyée par les marqueurs jusqu'aux caméras. Cela permet de géolocaliser les instruments en temps réel. (Courtoisie du Dr. Emery)

2. Méthode

Protocole et critères d'éligibilité

L'étude est conduite en suivant les recommandations du protocole PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*) (2).

La problématique de cette étude qualitative a ensuite été définie : « **Quels critères cliniques décisionnels peuvent conduire le chirurgien à choisir entre le guidage statique et la navigation dynamique dans le cadre d'une chirurgie guidée implantaire ?** »

Les critères d'éligibilité sont ensuite définis. Les études doivent être en langue anglaise et concerner le guidage statique et/ou la navigation dynamique dans le cadre de la chirurgie guidée en implantologie orale. Seuls les études impliquant l'homme (in-vitro, in-vivo) sont comprises dans la recherche. La publication doit avoir été faite depuis les 5 dernières années, soit depuis le 30 novembre 2013.

Source de données bibliographiques et stratégie de recherche

Les sources d'information utilisées pour ce travail de recherche proviennent de la base de données MEDLINE (PubMed). La recherche est effectuée le 28 novembre 2018.

La stratégie de recherche est la suivante :

```
((((((((((((((((((guide[Title] OR guides[Title]) OR
guided[Title]) OR static[Title]) OR dynamic[Title]) OR
navigation[Title]) OR image-guided[Title]) OR real-
time[Title]) OR computer-guided[Title]) OR
guidance[Title]) OR placement[Title]) OR
navigated[Title]) OR navigate[Title]) OR
positioning[Title]) OR template[Title])
AND
((implant[Title] OR implants[Title]) OR
implantology[Title])
AND
((((((((positioning[Title/Abstract] OR
placement[Title/Abstract] OR place[Title/Abstract] OR
placed[Title/Abstract] OR guidance[Title/Abstract] OR
position[Title/Abstract] OR insertion[Title/Abstract] OR
placing[Title/Abstract] OR accuracy[Title/Abstract] OR
positionment[Title/Abstract]))
```

Afin de diriger correctement la stratégie, une liste d'exclusion de 82 mots clés hors-sujet ou hors-étude, situés dans le titre ou le résumé de la publication, a été dressée de manière empirique. Ces mots clés ont été choisis après une lecture des titres des 200 premiers résultats et ajoutés à la recherche à l'aide de l'opérateur booléen « NOT » :

NOT

```
orbital[Title/Abstract] OR spinal[Title]) OR spine[Title]) OR
cochlear[Title/Abstract]) OR joint[Title]) OR
THA[Title/Abstract]) OR cardiac[Title/Abstract]) OR
prostate[Title/Abstract]) OR endodontic[Title]) OR
endodontics[Title]) OR pediatric[Title]) OR guided
bone[Title]) OR brachytherapy[Title/Abstract]) OR
harm[Title]) OR harms[Title]) OR doppler[Title]) OR
ultrasonic[Title]) OR ultrasound[Title]) OR sinus[Title])
OR nerve[Title]) OR arthroplasty[Title/Abstract]) OR
ophthalmic[Title/Abstract]) OR knee[Title/Abstract]) OR
orthognathic[Title/Abstract]) OR pelvic[Title/Abstract]) OR
femoral[Title/Abstract]) OR biopsy[Title/Abstract]) OR
hernia[Title/Abstract]) OR shoulder[Title]) OR
spine[Title/Abstract]) OR orthopedic[Title/Abstract]) OR
orthopaedic[Title/Abstract]) OR fracture[Title]) OR
fractures[Title]) OR hip[Title/Abstract]) OR
hips[Title/Abstract]) OR tumor[Title/Abstract]) OR
cancer[Title/Abstract]) OR fibular[Title/Abstract]) OR
elbow[Title/Abstract]) OR ankle[Title/Abstract]) OR
orthodontic[Title/Abstract]) OR fusion[Title]) OR
electrode[Title]) OR electrodes[Title]) OR
lateralization[Title]) OR electromagnetic[Title]) OR bone
conduction[Title]) OR soft[Title]) OR hard[Title]) OR
bone[Title]) OR mammoplasty[Title/Abstract]) OR
autogenous[Title/Abstract]) OR
osteonecrosis[Title/Abstract]) OR impression[Title]) OR
biphosphonate[Title/Abstract]) OR reconstruction[Title])
OR infected[Title]) OR noninfected[Title]) OR
iliac[Title/Abstract]) OR graft[Title/Abstract]) OR
grafting[Title/Abstract]) OR synovial[Title/Abstract]) OR
mentoplasty[Title/Abstract]) OR socket[Title/Abstract]) OR
decoronation[Title/Abstract]) OR urology[Title/Abstract])
OR scoliosis[Title/Abstract]) OR muscular[Title/Abstract])
OR pubic[Title/Abstract]) OR distraction[Title/Abstract])
OR breast[Title/Abstract]) OR smokers[Title/Abstract]) OR
toxin[Title/Abstract]) OR cells[Title/Abstract]) OR
cell[Title/Abstract]) OR infection[Title/Abstract]) OR
antibiotic[Title/Abstract]) OR zygomatic[Title/Abstract]) OR
immediate[Title/Abstract]) OR
electromagnetically[Title/Abstract]) OR
contraception[Title/Abstract]) AND "2013/11/30"[PDAT] :
"2018/11/28"[PDAT])
```

Sélection des études et extraction des données

Critères d'inclusion

Pour l'inclusion des articles dans l'étude, il a été décidé de sélectionner les études selon les critères d'inclusion suivants :

- Rédaction en anglais
- Titre de l'article impliquant la navigation dynamique et/ou le guidage statique en implantologie orale
- Présentation au moins d'un avantage et/ou d'un inconvénient et/ou d'une indication clinique recommandée
- Au moins 5 patients par étude (pour les études cliniques)
- Intégralité de l'article accessible en ligne

Critères d'exclusion

De la même manière des critères d'exclusion sont définis :

- Étude sur des guides partiellement limitants ou non limitants (dans la cadre du guidage statique)
- Étude sur des systèmes de navigation obsolètes ou non praticables en cabinet de ville (dans le cadre de la navigation dynamique)
- Étude sur les implants ptérygoïdes, zygomatiques ou les mini-implants orthodontiques.

La sélection des études a eu lieu en plusieurs étapes. D'abord, une inspection des titres de l'ensemble des résultats de la recherche a permis d'écarter toutes les études non concordantes avec le sujet de ce travail.

Ensuite, une lecture du résumé des publications retenues a confirmé le choix de ces études.

Enfin, une dernière lecture intégrale a permis de réaliser la sélection des études permettant d'apporter une réponse ou un élément de réponse à la problématique.

Extraction des données

L'extraction des données s'est faite avec le formulaire préétabli suivant :

Nom de l'article n° :			
Année de publication :			
Type d'étude :			
Méthode de chirurgie guidée présentée :	Guidage statique	ET / OU	Navigation dynamique
Marque du ou des systèmes :			
Nombre de patients de l'étude :			
Nombre de patients édentés :			
Nombre d'implants positionnés ou forages réalisés :			
Avantage(s) :			
Inconvénient(s) :			
Indication(s) :			

Analyses des données

Pour l'analyse des données, l'ensemble des formulaires remplis est repris dans le but d'obtenir des données statistiques simples. Au moins un des trois paramètres analysés (avantages, inconvénients et indications) a été abordé dans les articles. Au sein même des articles dans lesquels il figure, on pourra considérer l'importance d'un élément selon le nombre de fois qu'il est repris.

Ensuite, lorsque les avantages, inconvénients et indications ont été synthétisés pour chacune des deux méthodes, il convient alors de les confronter afin d'établir une synthèse descriptive permettant d'établir un consensus sur la sélection de la technique la plus recommandée en fonction du cas clinique.

Risque de biais relatif aux études

Devant la faible quantité d'articles à propos de la navigation dynamique en implantologie orale, dont la majorité sont des revues non-systématiques (rapport d'essais cliniques, revues narratives...), il existe dès le départ un biais important. En effet, les revues non-systématiques et les opinions d'experts présentent le plus faible niveau de preuve scientifiques (3). Ainsi, il a été décidé qu'une évaluation du risque de biais ne serait pas réalisée.

3. Résultats et analyse

Sélection des études

La recherche électronique initiale a relevé **3041** articles au sein de la base de données PubMed. Une fois complétée par l'exclusion des 82 mots clés hors-sujet (établis lors d'une lecture des 200 premiers titres), 182 articles ont été retenus.

Lors de la première étape de sélection (« screening »), la lecture du titre des **182** articles a permis de conserver **71** articles en vue d'une lecture du résumé. 3 articles supplémentaires provenant d'une recherche manuelle sont ajoutés à la sélection.

A l'issue de cette première étape de screening, **52** articles sont gardés pour l'étape d'éligibilité.

L'étape d'éligibilité, au travers d'une lecture intégrale, a écarté tous les articles ne respectant pas les critères d'inclusion ou présentant des critères d'exclusion. Ainsi, **24** articles restent alors sélectionnés pour l'extraction des données permettant d'apporter un élément de réponse à la problématique de ce travail. La navigation dynamique est traitée dans 9 de ces articles. Un diagramme de flux (Figure 4) permet d'établir une synthèse du processus de sélection des études.

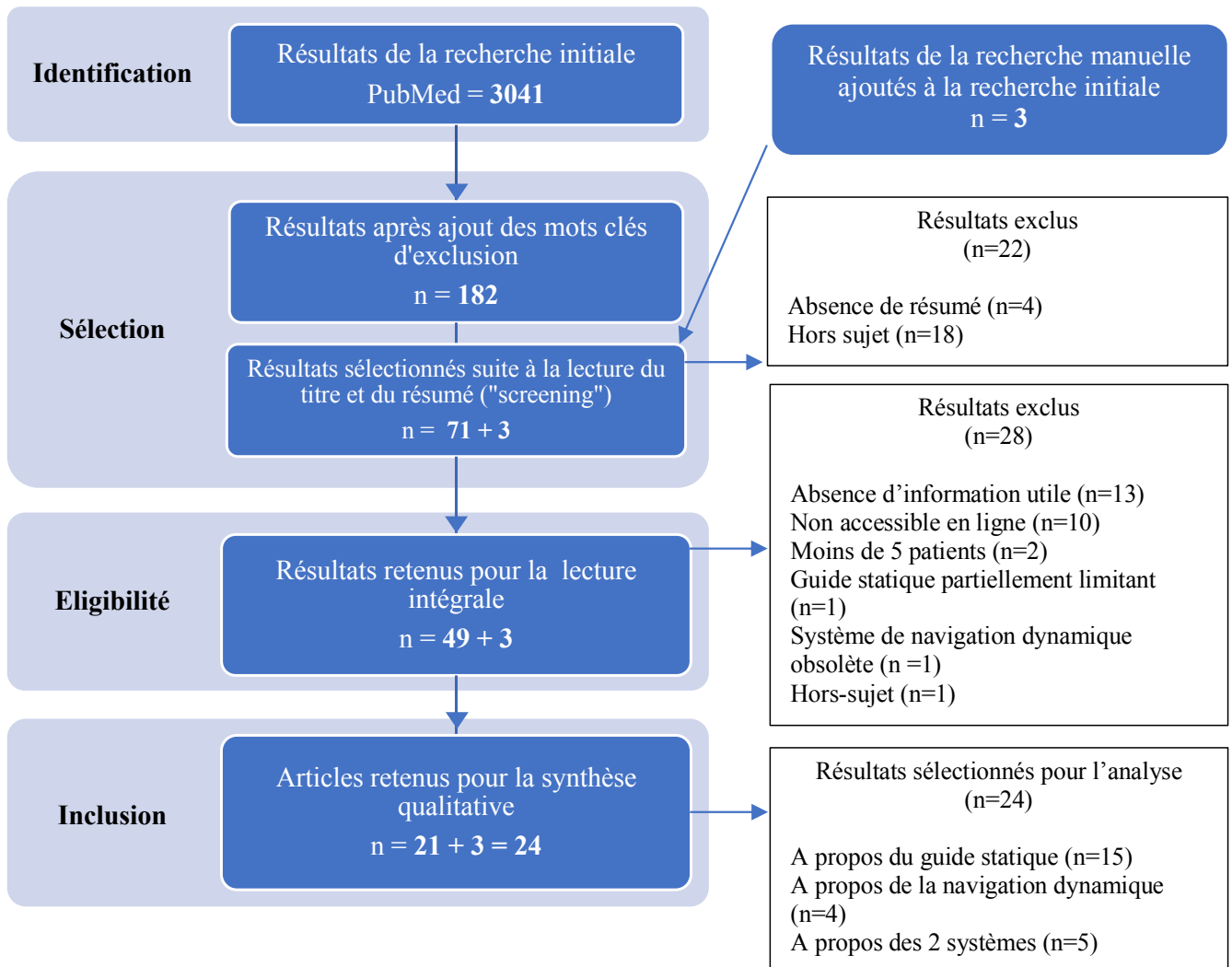


Figure 4 : Diagramme de flux rapportant la sélection des articles selon le protocole PRISMA

Caractéristiques et résultats des études sélectionnées

L'ensemble des 24 études sélectionnées est présenté au travers du Tableau 2. Ce dernier regroupe les avantages, inconvénients et indications associés aux caractéristiques de chacune des études.

N°	Études	Nature de l'étude	Méthode(s) traité(s)	Nb de patients/modèles	Nb de patients/modèles édentés	Nb d'implants positionnés /forages	Avantage(s)	Inconvénient(s)	Indication(s)
1	Colombo et al., 2017(4)	RS	GS	110	/	/	-Temps peropératoire réduit -Précision élevée -Réhabilitation prothétique facilitée -Intervention mini-invasive (sans lambeau) -Possible dispense d'une chirurgie pré-implantaire	-Temps préopératoire augmenté -Risque de complications techniques (instabilité, fracture, erreur de matching...) -Investissement -Courbe d'apprentissage	-Mise en charge immédiate d'un bridge complet provisoire réalisé en préopératoire -Haute précision requise
2	Oh et al., 2017(5)	EC	GS	5	5	20	-Précision élevée -Intervention mini-invasive	-Risque de complications techniques -Difficulté d'irrigation du site de forage -Imprécision résiduelle -Encombrement et difficulté d'utilisation en secteur postérieur	-Mise en charge immédiate d'un bridge complet provisoire réalisé en préopératoire
3	Deeb et al., 2017(6)	EC	GS	10	0	10	-Précision élevée -Temps peropératoire réduit	-Courbe d'apprentissage -Difficulté d'irrigation du site de forage -Risque de complications techniques -Temps préopératoire augmenté	-Chirurgie sans lambeau permettant d'éviter une exposition de chirurgie pré-implantaire -Positionnement précis -Livraison immédiate d'une restauration provisoire réalisée en préopératoire
4	Laleman et al., 2017(7)	RS	GS	181	181	1194	-Temps peropératoire réduit -Intervention mini-invasive	-Risque de complications techniques -Temps préopératoire augmenté -Coût financier -Instruments supplémentaires	-Mise en charge immédiate d'un bridge complet provisoire réalisé en préopératoire
5	Raico Gallardo et al., 2017(8)	RS	GS	/	/	/	-Précision élevée -Intervention mini-invasive	-Vision directe sur le site du forage obstruée	/
6	Greenberg et al., 2015(9)	RN	GS	/	/	/	-Précision élevée -Intervention mini-invasive -Possible dispense d'une chirurgie pré-implantaire	-Courbe d'apprentissage -Coût financier	-Positionnement dans une alvéole post-extractionnelle (guidage mécanique)
7	Kernen et al., 2016(10)	EIV	GS	8	/	34	-Précision élevée	-Risque de complications techniques	/
8	Vercruyssen et al., 2014(11)	EC	GS	59	/	314	-Intervention mini-invasive	-Difficulté d'irrigation du site de forage	/
9	Verhamme et al., 2015(12)	EC	GS	25	25	150	-Précision élevée -Intervention mini-invasive	-Risque de complication du positionnement implantaire lié au vis transcorticales de fixation -Risque de complications techniques -Imprécision résiduelle	/

								-Difficulté ou impossibilité d'utilisation en cas d'ouverture buccale limitée -Déviation verticale résiduelle (enfouissement de l'implant trop superficiel)	
10	Vercruyssen et al., 2015(13)	EC	GS	60	60	310	-Temps peropératoire réduit -Intervention mini-invasive -Confort du patient augmenté -Précision élevée	-Déviation verticale résiduelle -Difficulté ou impossibilité d'utilisation en cas d'ouverture buccale limitée -Difficulté d'utilisation en secteur postérieur (2 ^{ème} molaire)	-Contre-indication avec une ouverture buccale limitée -Contre-indication en secteur postérieur au niveau de la 2 ^{ème} molaire
11	Zhao et al., 2014(14)	EC	GS	11	0	31	-Précision élevée -Intervention mini-invasive -Sécurité du geste opératoire augmentée -Possible dispense d'une chirurgie pré-implantaire	-Risque de complications techniques -Imprécision résiduelle -Coût financier -Temps préopératoire augmenté	-Contre-indication avec une ouverture buccale limitée -Utilisation non recommandée en secteur postérieur
12	Mora et al., 2014(15)	RN	GS	/	/	/	-Précision élevée	-Courbe d'apprentissage	-Site anatomique complexe (alvéole post-extractionnelle...)
13	Sun et al., 2015(16)	EC	GS	18	18	80	-Intervention mini-invasive	-Pas de modification possible de la planification implantaire en peropératoire -Risque de complications techniques -Imprécision résiduelle	-Haute précision requise
14	Cassetta et al., 2014(17)	EC	GS	24	24	172	/	-Imprécision résiduelle	/
15	Verhamme et al., 2015(18)	EC	GS	30	30	104	-Précision élevée -Possible dispense d'une chirurgie pré-implantaire	-Risque de complications techniques (consensus sur l'utilisation de 3 vis transcorticales de fixation)	/
16	Jokstad et al., 2018(19)	EC	N	20	0	41	-Précision élevée -Intervention mini-invasive chez le patient denté -Réhabilitation prothétique facilitée -Utilisation et flux de travail simplifié	-Vigilance sur la non-obstruction du champ de vision des stéréo-caméras -Perturbation possible de la lumière ambiante sur le suivi -Système encore trop volumineux -Préparation préopératoire importante -Morbidity chez le patient édenté (marqueurs) -Temps préopératoire augmenté	/
17	Pellegrino et al., 2017(20)	EC	N	5	0	5	-Modification possible de la planification implantaire en peropératoire -Accès au secteur postérieur facilité	/	-Site implantaire postérieur

18	Block et al., 2017(21)	EC	N (et GS)	478	0	714	<p>Navigation dynamique</p> <ul style="list-style-type: none"> -Modification possible de la planification implantaire en peropérateur -Précision élevée -Intervention mini-invasive chez le patient denté -Accès au site de forage facilité (notamment en postérieur) -Pas de trousse de chirurgie guidée nécessaire -Ergonomie pour l'opérateur (vision indirecte) <p>Guide statique</p> <p>/</p>	<p>Navigation dynamique</p> <ul style="list-style-type: none"> -Courbe d'apprentissage <p>Guide statique</p> <ul style="list-style-type: none"> -Pas de modification possible de la planification implantaire en peropérateur -Temps préopérateur augmenté -Coûts financiers augmentés -Courbe d'apprentissage -Accès difficile en postérieur au niveau de la deuxième molaire -Vision directe sur le site forage obstruée -Instruments supplémentaires de chirurgie guidée nécessaire 	<p>Navigation dynamique</p> <ul style="list-style-type: none"> -Site implantaire postérieur -Ouverture buccale limitée <p>Guide statique</p> <ul style="list-style-type: none"> -Ouverture buccale normale -Site implantaire avant la deuxième molaire
19	Emery et al., 2016(22)	EIV	N	27	6	47	<ul style="list-style-type: none"> -Chirurgie possible le même jour que la planification implantaire -Modification possible de la planification implantaire en peropérateur -Vision directe sur le site du forage -Sécurité du geste opératoire optimale -Précision élevée -Réduction du coût à long terme par rapport au guide statique 	/	<ul style="list-style-type: none"> -Ouverture buccale limitée -Faible espace interdentaire (contre-indiquant la mise en place d'un guide statique) -Secteur postérieur au niveau de la 2^{ème} molaire -Réflexe nauséeux exacerbé empêchant la prise d'empreinte traditionnelle
20	Block et al., 2016(23)	RN	N et GS	/	/	/	<p>Navigation dynamique</p> <ul style="list-style-type: none"> -Précision élevée -Réduction du coût à long terme par rapport au guide statique -Modification possible de la planification -Intervention mini-invasive chez le patient denté -Ergonomie pour l'opérateur -Accès au secteur postérieur facilité (2^{ème} molaire) <p>Guide statique</p> <ul style="list-style-type: none"> -Précision élevée -Intervention mini-invasive -Possibilité de réaliser en préopérateur la restauration prothétique provisoire 	<p>Navigation dynamique</p> <ul style="list-style-type: none"> -Courbe d'apprentissage <p>Guide statique</p> <ul style="list-style-type: none"> -Temps préopérateur augmenté -Coûts financiers augmentés -Pas de modification possible de la planification -Courbe d'apprentissage -Difficulté d'irrigation du site de forage -Accès difficile en postérieur au niveau de la deuxième molaire -Difficulté ou impossibilité d'utilisation en cas d'ouverture buccale limitée 	<p>Navigation dynamique</p> <ul style="list-style-type: none"> -Ouverture buccale limitée -Mise en place des implants le même jour que la planification implantaire -Secteur postérieur (2^{ème} molaire) -Site de forage où la vision directe est difficile à cause d'éléments anatomiques encombrants (langue volumineuse, tonicité des muscles...) -Faible espace interdentaire -Position idéale de l'implant en interférence avec la douille du guide statique <p>Guide statique</p> <ul style="list-style-type: none"> -Patient édenté

24	Yeshwante et al., 2017(27)	RN	N et GS	/	/	/	<p>Navigation dynamique</p> <ul style="list-style-type: none"> -Modification possible de la planification -Précision élevée -Sécurité du geste opératoire optimale <p>Guide statique</p> <ul style="list-style-type: none"> -Intervention mini-invasive -Possibilité de réaliser en préopératoire la restauration prothétique provisoire -Précision élevée -Sécurité du geste opératoire 	<p>Guide statique</p> <ul style="list-style-type: none"> -Imprécision résiduelle -Risque de complications techniques (perte de douille, fracture, instabilité...) -Difficulté ou impossibilité d'utilisation en cas d'ouverture buccale limitée 	/

Tableau 2 : Caractéristiques et résultats des études sélectionnées

RN – Revue narrative
EIV – Étude in-vitro
EC – Essais cliniques
RS – Revue systématique

N – Navigation dynamique
GS – Guide statique
(et GS) – Traité dans l'article mais non compris dans l'essai clinique

Synthèse et analyse des résultats

A ce stade, les paramètres analysés sont repris afin d'obtenir deux tableaux récapitulatifs (Tableaux 3 et 4) mentionnant l'ensemble des avantages, des inconvénients et des indications associés au guidage statique et à la navigation dynamique, rencontré dans la littérature.

Le guide statique

Guide statique	Nombre d'articles
Avantages	/20
Temps peropératoire réduit	5
Précision élevée	15
Réhabilitation prothétique facilitée	1
Intervention mini-invasive	13
Possible dispense d'une chirurgie péri-implantaire	4
Confort du patient augmenté	1
Possibilité de réaliser en préopératoire la restauration provisoire	3
Sécurité du geste opératoire augmentée	2
Inconvénients	/20
Temps préopératoire augmenté	6
Risque de complications techniques (instabilité, fracture...)	11
Investissement et coûts	7
Courbe d'apprentissage	7
Difficulté d'irrigation du site	5
Instruments supplémentaires (trousse de chirurgie guidée)	2
Imprécision résiduelle	7
Encombrement et difficulté d'accès en secteur postérieur	4
Vision directe sur le site du forage obstruée	2
Risque de complication du positionnement implantaire lié au vis transcorticales	1
Difficulté ou impossibilité d'utilisation en cas d'ouverture buccale limitée	6
Pas de modification possible de la planification implantaire en peropératoire	5
Indications	/20
Précision élevée requise	2
Livraison immédiate d'une restauration ou d'un bridge complet provisoire réalisé(e) en préopératoire	5
Chirurgie mini-invasive (sans lambeau)	2
Positionnement sur un site irrégulier (alvéole post-extractionnelle...)	3
Ouverture buccale normale	3
Site implantaire situé avant M2	2
Patient denté ou édenté	1
Réduction osseuse sous chirurgie guidée	1

Tableau 3 : Avantages, inconvénients et indications du guidage statique relevés dans la littérature

La navigation dynamique

Navigation dynamique	Nombre d'articles
Avantages	/9
Précision élevée	8
Intervention mini-invasive chez le patient denté	4
Réhabilitation prothétique facilitée	1
Utilisation et flux de travail simplifié	2
Modification possible de la planification implantaire en peropératoire	7
Accès aux secteurs postérieurs facilité	5
Pas d'instrumentation supplémentaire nécessaire (trousse de chirurgie guidée...)	2
Position ergonomique	3
Chirurgie possible le même jour que la planification implantaire	1
Vision directe sur le site du forage	2
Sécurité du geste opératoire optimale	3
Réduction du coût à long terme par rapport aux guides statiques	3
Confort du patient	1
Possibilité de réaliser en préopératoire la restauration provisoire	1
Inconvénients	/9
Courbe d'apprentissage	5
Morbidité chez le patient édenté (marqueurs)	2
Possible obstruction du champ de suivi des caméras	2
Perturbation par la lumière ambiante	1
Temps préopératoire augmenté (calibrage)	2
Volume du système	1
Risque « d'effet entonnoir »	1
Investissement initial	1
Indications	/9
Site implantaire postérieur	6
Ouverture buccale limitée	4
Réflexe nauséux hyper-accentué contre-indiquant la prise d'empreinte traditionnelle	1
Intervention le même jour que la planification	2
Site de forage où la vision directe est difficile	1
Faible espace interdentaire	2
Position idéale de l'implant en interférence avec la douille du guide statique	1

Tableau 4 : Avantages, inconvénients et indications de la navigation dynamique relevés dans la littérature

Au travers de cette analyse, il ressort de nombreuses informations. D'abord, navigation dynamique et guidage statique présentent des avantages communs liés à la chirurgie guidée. On peut citer principalement, le gain de précision (au moins similaire entre les deux méthodes et significativement supérieur par rapport à une approche à « main levée »), une réhabilitation prothétique facilitée et la réduction du caractère invasif de l'opération dans le cadre d'une chirurgie sans lambeau. Du côté des inconvénients, elles partagent la contrainte d'une courbe d'apprentissage significative.

Avantages de la navigation dynamique

Cependant, face au guide statique, le système passif affiche de nombreux atouts. L'un des premiers avantages retrouvé majoritairement dans la littérature, et qui fait la force du système passif, est la capacité de changer ou d'ajuster la planification initiale au cours de l'intervention, en fonction de ce que constate l'opérateur (densité osseuse trop faible par exemple...). La sécurité du geste opératoire en est alors augmentée.

Il est également rapporté que l'utilisation d'un navigateur permet d'éviter l'encombrement du guide statique. De ce fait, le chirurgien dispose d'une vision directe et d'une irrigation facilitée sur le site du forage. De plus, sans guide, le contre-angle opératoire est monté avec des forets classiques d'ostéotomie. L'accès devient alors plus facile pour les secteurs postérieurs et l'absence de guide permet une meilleure approche pour les sites encastrés. En effet, l'espace entre deux dents est parfois trop faible pour recevoir, dans une position idéale, la douille métallique de guidage. Et, l'ouverture buccale du patient, parfois limitée, peut également empêcher l'utilisation d'un guide avec des forets plus longs.

Le flux de travail d'un système de guidage dynamique est aujourd'hui optimisé. Il est possible pour le praticien d'examiner le patient, de procéder à l'examen 3D, de planifier l'implant et de réaliser la pose le même jour sur un même système.

Enfin, au cours de la chirurgie, le praticien reste concentré sur l'écran de contrôle pendant que son assistant(e) opératoire surveille le bon déroulement directement en bouche. Il profite ainsi d'une vision indirecte lui permettant d'adopter une position ergonomique optimale.

Inconvénients de la navigation dynamique

Même si cette technique possède moins d'inconvénients que le guide statique, le praticien doit avoir conscience de quelques points faibles.

La courbe d'apprentissage est connue pour être un réel frein dans l'utilisation d'un tel système. L'étude récente de Block et al. (25) avance qu'une vingtaine d'implants est nécessaire pour une maîtrise suffisante de l'appareil.

Un autre obstacle est l'investissement initial que le praticien doit envisager (28). Bien qu'il ait été fortement revu à la baisse depuis une dizaine d'années, il faut aujourd'hui compter entre 20 000 € et 30 000 € pour faire l'acquisition d'un navigateur. Cependant, contrairement aux guides statiques, à long terme la navigation dynamique devient économique car il n'y a plus de coût de laboratoire à prévoir pour chaque intervention.

Jokstad et Verbruggen soulignent dans leurs études une certaine morbidité de l'utilisation de la navigation dynamique chez le patient édenté. En effet, lorsqu'il n'y a plus de dent pour maintenir le repère radio-opaque, il est nécessaire de positionner des vis d'ostéosynthèse sur l'ensemble du procès alvéolaire de l'arcade. Ces vis constituent le repère radio-opaque de l'édenté mais ne présentent pas d'attache pour le marqueur-arcade. Ainsi, ce dernier sera fixé, en plus, sur le procès vestibulaire à l'aide d'une plaque d'ostéosynthèse.

Jokstad et al. ont alors soulevé l'interrogation suivante : comment justifier l'amplification du caractère invasif causée par le calibrage du navigateur chez un patient édenté par rapport à l'utilisation d'un guide statique muco-supporté ?

Enfin, même si elles ont été fortement diminuées par rapport aux guides statiques, des complications techniques subsistent. Le suivi optique implique qu'il ne doit pas y avoir d'interférence entre les marqueurs et les caméras. De plus, une bascule du marqueur-arcade, fixé en bouche, entraînerait une altération des repères rendant impossible le suivi. C'est en veillant à éviter ces difficultés que le praticien apprendra à travailler avec un système de navigation dynamique.

Indications des méthodes de chirurgie guidée

La navigation fait aujourd'hui figure de nouvel outil thérapeutique disponible. Cependant, il est essentiel de discerner l'ensemble des indications pour lesquelles elle apporte un réel intérêt par rapport aux guides statiques actuels. En effet, devant certains cas cliniques, elle peut se révéler moins bénéfique.

D'après les différentes informations relevées dans les 24 articles sélectionnés pour cette revue (Tableaux 3 et 4), nous pouvons les confronter afin d'en ressortir l'ensemble des indications associées à chacune des techniques.

Les guides statiques conservent plusieurs indications qui leurs sont propres :

- Chirurgie sans lambeau chez le patient édenté.
- Réduction de crête osseuse envisagée par chirurgie guidée chez le patient édenté (29).
- Réalisation d'un bridge complet implanto-porté planifié par un positionnement précis des implants. *Cet indication serait expliquée par une précision du guide statique qui augmente, par rapport à la navigation dynamique, avec le nombre d'implants à poser. Cette notion de « facteur nombre » doit être confirmée.*

- Réalisation d'un bridge complet provisoire à l'aide du guide statique, préalablement à la chirurgie (30).
- Positionnement d'un implant sur un site anatomique irrégulier (post-extractionnel...).

De la même manière, les cas suivants sont des indications plus adaptées pour les navigateurs dynamiques :

- Ouverture buccale limitée du patient.
- Accès difficile au site implantaire situé au niveau d'un secteur dentaire postérieur (deuxième molaire).
- Vision directe difficile ou impossible à cause d'obstacle anatomique (macroglossie, hypertonicité musculaire...).
- Espace interdentaire faible pour placer le guide statique avec la douille métallique.
- Réflexe nauséux hyper-accentué contre-indiquant la prise d'empreinte traditionnelle.
- Chirurgie ayant lieu le même jour que la planification.
- Doute sur la chirurgie implantaire pouvant impliquer une éventuelle modification de la planification au cours de l'intervention.

Utilisés de manière complémentaire, le guide statique et le navigateur limitent leurs propres inconvénients. Le praticien devient alors capable de réaliser une chirurgie guidée dans la plupart des situations cliniques.

Pour conduire le praticien vers la technique la plus adaptée au patient, un organigramme décisionnel peut être construit (Figure 5).

4. Discussion

Certaines données relevées dans cette étude et présentées notamment dans le tableau 4 peuvent amener le lecteur à s'interroger. D'abord l'article de *Block et al.* (25), avance que l'un des avantages de la navigation dynamique est la possibilité de réaliser en préopératoire la restauration provisoire. Cependant, il est difficilement praticable pour un praticien de placer des analogues d'implant, selon la position planifiée, dans un modèle en résine à l'aide du même système de navigation pour réaliser la restauration provisoire. Cet avantage reste offert par le guide statique. En effet, ce dernier peut recevoir les analogues d'implant directement sur les douilles. De la même manière que pour une empreinte classique implantaire, on obtient un modèle en plâtre contenant les analogues selon la situation planifiée. Le laboratoire sera en capacité de réaliser la restauration provisoire implantoportée avant l'intervention.

Le critère portant sur le réflexe nauséux exacerbé s'avère de moins en moins significatif avec l'utilisation grandissante des empreintes optiques.

Devant la faible quantité d'articles présentement disponibles, il est important d'insister que les risques de biais dans cette étude sont importants et que les niveaux de preuves

des articles sont insuffisants. Néanmoins, l'objectif de ce travail est avant tout de permettre au lecteur d'avoir une idée globale sur la chirurgie guidée en implantologie à l'heure actuelle et d'être capable de discerner les principaux atouts de chacune de ces deux techniques modernes. Ainsi, il est essentiel que de futures études soient publiées notamment sur la navigation dynamique.

5. Conclusion

Le digital faisant maintenant parti du quotidien des chirurgiens-dentistes permet d'évoluer considérablement l'implantologie orale. La gestion du positionnement implantaire est entièrement revue par la technologie numérique. Guidage statique et dynamique portent la chirurgie à un autre niveau en termes de précision et de prédictibilité.

Aujourd'hui, le guidage statique est utilisé régulièrement par certains implantologues. Davantage de cabinets modernes possèdent des appareils d'imagerie tridimensionnelle, des scanners optiques ou encore des imprimantes 3D pour la fabrication des guides chirurgicaux.

Parallèlement, l'investissement initial et la courbe d'apprentissage liés aux systèmes de navigation restent un véritable frein pour la majorité des praticiens. Cependant, la technologie ne cesse d'avancer, les coûts diminuent et les protocoles sont simplifiés pendant que les praticiens sont de plus en plus exposés à cette technologie. L'intérêt de la navigation en implantologie n'est plus à démontrer dans la littérature mais doit encore être confirmé d'un point de vue clinique. Son utilisation ne permet pas « encore » de traiter l'ensemble des situations cliniques notamment chez un patient édenté.

Les recherches faites dans le cadre de cette thèse peuvent évoquer que l'empreinte optique est au prosthodontiste ce que la navigation est à l'implantologue. Il est alors aisé d'imaginer pour la navigation un avenir sensiblement identique aux systèmes d'empreinte optique qui gagnent de plus en plus l'attention des praticiens suites aux avancées techniques majeures de ces dernières années.

Pour conclure ce travail, quelle que soit la technique sélectionnée, l'essentiel est d'assurer un positionnement permettant d'apporter au patient le meilleur succès thérapeutique possible. Alors que ce dessein peut être réalisé par une approche dite « à main levée », les systèmes statiques et dynamiques donnent lieu à un résultat plus prédictible. Ainsi, la navigation dynamique est devenue un outil de choix en implantologie. Cependant, devant l'ensemble des situations cliniques, cela engage le praticien à savoir également travailler avec le guide statique s'il souhaite rester dans le cadre de la chirurgie guidée.

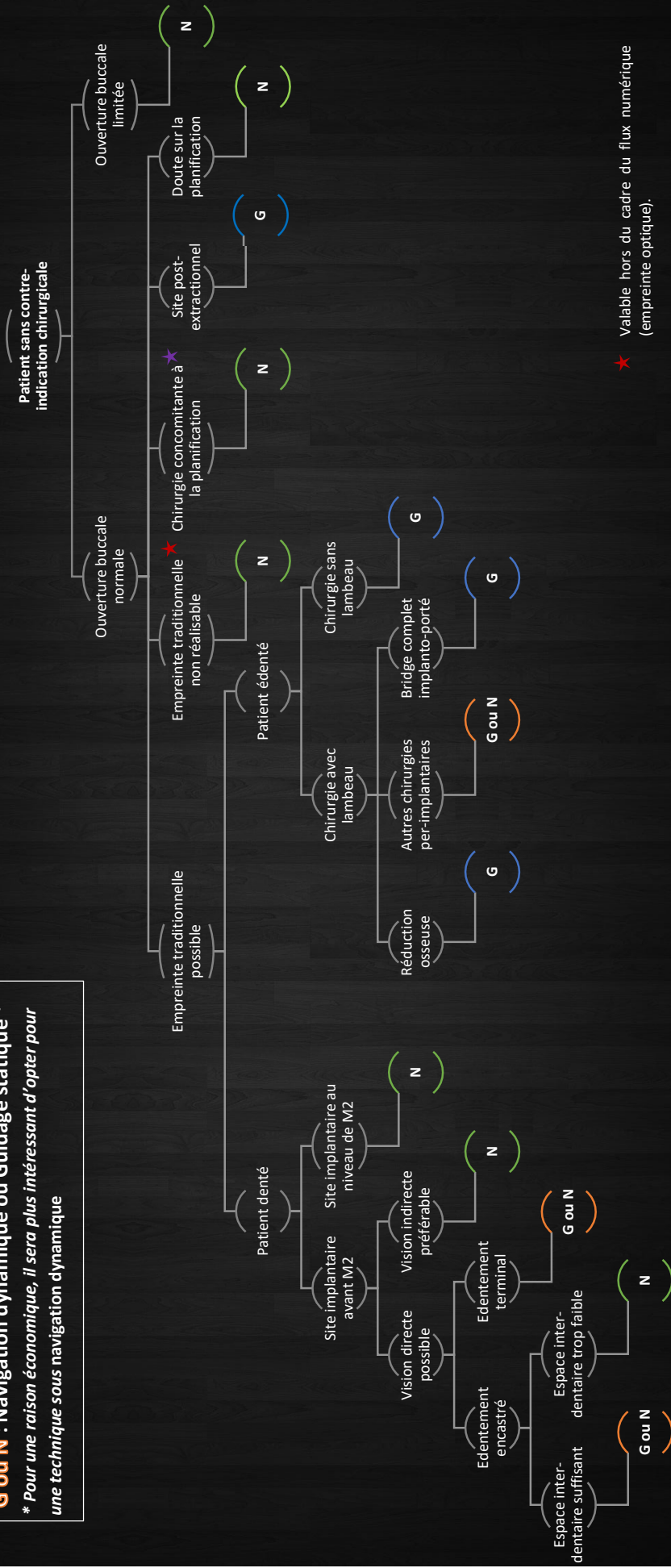
Technique indiquée

N : Navigation dynamique

G : Guidage statique

G ou N : Navigation dynamique ou Guidage statique *

* Pour une raison économique, il sera plus intéressant d'opter pour une technique sous navigation dynamique



★ Valable hors du cadre du flux numérique (empreinte optique).

★ Valable en l'absence de la possibilité de préparer le guide en interne dans la journée.

Figure 5 : Sélection de la technique d'assistance peropératoire en fonction du terrain clinique au patient

Conflit d'intérêt

Les auteurs déclarent ne tenir aucun conflit d'intérêt.

Informations

Cet article n'a pas pour vocation d'expliquer la navigation dynamique dans son intégralité. Pour avoir davantage de précisions sur le fonctionnement de ce système, la thèse d'exercice : « Chirurgie guidée en implantologie orale : du guide statique à la navigation dynamique » (Université de Lille – Faculté de chirurgie dentaire - 2019) peut être utile.

Remerciements

Au Dr. Robert W. Emery, pour son soutien et son aide apportée dans l'élaboration de cette revue.

Références

1. Chen C-K, Yuh D-Y, Huang R-Y, Fu E, Tsai C-F, Chiang C-Y. Accuracy of Implant Placement with a Navigation System, a Laboratory Guide, and Freehand Drilling. *Int J Oral Maxillofac Implants.* déc 2018;33(6):1213-8.
2. Gedda M. Traduction française des lignes directrices STARD pour l'écriture et la lecture des études sur la précision des tests diagnostiques. *Kinésithérapie Rev.* 1 janv 2015;15(157):45-9.
3. Watine J. Revues systématiques et méta-analyses en biologie clinique: principes et méthodes. *Ann Biol Clin.* 2004;62:17.
4. Colombo M, Mangano C, Mijiritsky E, Krebs M, Hauschild U, Fortin T. Clinical applications and effectiveness of guided implant surgery: a critical review based on randomized controlled trials. *BMC Oral Health.* 13 déc 2017;17:150.
5. Oh J-H, An X, Jeong S-M, Choi B-H. Digital Workflow for Computer-Guided Implant Surgery in Edentulous Patients: A Case Report. *J Oral Maxillofac Surg.* déc 2017;75(12):2541-9.
6. Deeb GR, Allen RK, Hall VP, Whitley D, Laskin DM, Bencharit S. How Accurate Are Implant Surgical Guides Produced With Desktop Stereolithographic 3-Dimensional Printers? *J Oral Maxillofac Surg.* déc 2017;75(12):2559.e1-2559.e8.
7. Laleman I, Bernard L, Vercruyssen M, Jacobs R, Bornstein M, Quirynen M. Guided Implant Surgery in the Edentulous Maxilla: A Systematic Review. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2017;31:s103-17.
8. Raico Gallardo YN, da Silva-Olivio IRT, Mukai E, Morimoto S, Sesma N, Cordaro L. Accuracy comparison of guided surgery for dental implants according to the tissue of support: a systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Implants Res.* mai 2017;28(5):602-12.
9. Greenberg AM. Digital Technologies for Dental Implant Treatment Planning and Guided Surgery. *Oral Maxillofac Surg Clin N Am.* mai 2015;27(2):319-40.
10. Kernen F, Benic GI, Payer M, Schär A, Müller-Gerbl M, Filippi A, et al. Accuracy of Three-Dimensional Printed Templates for Guided Implant Placement Based on Matching a Surface Scan with CBCT: Accuracy of Printed Templates. *Clin Implant Dent Relat Res.* août 2016;18(4):762-8.
11. Vercruyssen M, van de Wiele G, Teughels W, Naert I, Jacobs R, Quirynen M. Implant- and patient-centred outcomes of guided surgery, a 1-year follow-up: An RCT comparing guided surgery with conventional implant placement. *J Clin Periodontol.* déc 2014;41(12):1154-60.
12. Verhamme LM, Meijer GJ, Bergé SJ, Soehardi RA, Xi T, de Haan AFJ, et al. An Accuracy Study of Computer-Planned Implant Placement in the Augmented Maxilla Using Mucosa-Supported Surgical Templates: Accuracy of Implant Placement in the Augmented Maxilla. *Clin Implant Dent Relat Res.* déc 2015;17(6):1154-63.
13. Vercruyssen M, Coucke W, Naert I, Jacobs R, Teughels W, Quirynen M. Depth and lateral deviations in guided implant surgery: an RCT comparing guided surgery with mental navigation or the use of a pilot-drill template. *Clin Oral Implants Res.* nov 2015;26(11):1315-20.
14. Zhao XZ, Xu WH, Tang ZH, Wu MJ, Zhu J, Chen S. Accuracy of Computer-Guided Implant Surgery by a CAD/CAM and Laser Scanning Technique. 2014;17(1):6.
15. Mora MA, Chenin DL, Arce RM. Software Tools and Surgical Guides in Dental-Implant-Guided Surgery. *Dent Clin North Am.* juill 2014;58(3):597-626.
16. Sun Y, Luebbbers H-T, Agbaje JO, Schepers S, Politis C, Van Slycke S, et al. Accuracy of Dental Implant Placement Using CBCT-Derived Mucosa-Supported Stereolithographic Template: Accuracy of Guided Implantology. *Clin Implant Dent Relat Res.* oct 2015;17(5):862-70.
17. Cassetta M, Di Mambro A, Giansanti M, Stefanelli LV, Barbato E. How does an error in positioning the template affect the accuracy of implants inserted using a single fixed mucosa-supported stereolithographic surgical guide? *Int J Oral Maxillofac Surg.* janv 2014;43(1):85-92.
18. Verhamme LM, Meijer GJ, Boumans T, de Haan AFJ, Bergé SJ, Maal TJJ. A Clinically Relevant Accuracy Study of Computer-Planned Implant Placement in the Edentulous Maxilla Using Mucosa-Supported Surgical Templates: Clinically Relevant Implant Validation of Computer-Planned Implants. *Clin Implant Dent Relat Res.* avr 2015;17(2):343-52.
19. Jokstad A, Winnett B, Fava J, Powell D, Somogyi-Ganss E. Investigational Clinical Trial of a Prototype Optoelectronic Computer-Aided Navigation Device for Dental Implant Surgery. *Int J Oral Maxillofac Implants.* juin 2018;33(3):679-92.
20. Pellegrino G, Taraschi V, Vercellotti T,

- Ben-Nissan B, Marchetti C. Three-Dimensional Implant Positioning with a Piezosurgery Implant Site Preparation Technique and an Intraoral Surgical Navigation System: Case Report. *Int J Oral Maxillofac Implants*. juin 2017;32(3):e163-5.
21. Block MS, Emery RW, Cullum DR, Sheikh A. Implant Placement Is More Accurate Using Dynamic Navigation. *J Oral Maxillofac Surg*. 1 juill 2017;75(7):1377-86.
22. Emery RW, Merritt SA, Lank K, Gibbs JD. Accuracy of Dynamic Navigation for Dental Implant Placement-Model-Based Evaluation. *J Oral Implantol*. oct 2016;42(5):399-405.
23. Block MS, Emery RW. Static or Dynamic Navigation for Implant Placement—Choosing the Method of Guidance. *J Oral Maxillofac Surg*. 1 févr 2016;74(2):269-77.
24. Vercruyssen M, Fortin T, Widmann G, Jacobs R, Quirynen M. Different techniques of static/dynamic guided implant surgery: modalities and indications. *Periodontol 2000*. oct 2014;66(1):214-27.
25. BLOCK, Michael S., EMERY, Robert W., LANK, Kathryn et RYAN, James. Implant Placement Accuracy Using Dynamic Navigation. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*. février 2017. Vol. 32, n° 1, pp. 92-99.
26. Somogyi-Ganss E, Holmes HI, Jokstad A. Accuracy of a novel prototype dynamic computer-assisted surgery system. *Clin Oral Implants Res*. 1 août 2015;26(8):882-90.
27. Yeshwante B, Baig N, Tambake SS, Tambake R, Patil V, Rathod R. MASTERING DENTAL IMPLANT PLACEMENT: A REVIEW. *J Appl Dent Med Sci*. 2017;3:2.
28. Tregouët Y-M. Intérêt clinique de la navigation implantaire dynamique: le point sur la littérature [Thèse d'exercice]. [France]: Université de Nantes. Unité de Formation et de Recherche d'Odontologie; 2018.
29. Ganz DSD. 3-D virtual planning concepts for implant-retained full-arch mandibular prostheses. *Int Mag Cone Beam Dent*. 2014;(3):6.
30. Block MS. Treatment Planning and Perioperative Management of the Dental Implant Patient. In: Ferneini EM, Bennett JD, éditeurs. *Perioperative Assessment of the Maxillofacial Surgery Patient: Problem-based Patient Management*. Cham: Springer International Publishing; 2018. p. 433-54.

Thèse d'exercice : Chirurgie Dentaire : Lille 2 : Année 2019 – N°:

Chirurgie guidée en implantologie orale : du guide statique à la navigation dynamique / **JEFFROY Kévin** - p. 124 : ill. 50 ; réf. 106.

Domaine : Implantologie orale

Mots clés Rameau : Implants dentaires ;

Mots clés FMesh : Chirurgie assistée par ordinateur ; Implants dentaires

Mots clés libres : Navigation dynamique ; Chirurgie guidée ; Implant dentaire ; Guide chirurgical

Résumé de la thèse :

Actuellement, pour la mise en place d'un implant, le chirurgien réalise souvent la chirurgie à main levée ou bien à l'aide d'un guide chirurgical. Cet élément rigide fixé sur l'arcade a pour objet d'aider l'opérateur à placer l'implant dans la position tridimensionnelle prévue lors de la planification implantaire. Ce transfert de données entre la phase de planification et la phase chirurgicale peut cependant être effectué par un autre grand système : la navigation chirurgicale.

L'objectif de cette thèse est d'exposer au lecteur ce nouvel outil thérapeutique disponible en chirurgie implantaire, d'en comprendre son principe de fonctionnement, ses caractéristiques et indications précises. L'étude nous permettra de déterminer quelle approche le praticien doit adopter pour sélectionner la technique de chirurgie guidée la plus adaptée en fonction du cas clinique.

JURY :

Président : Professeur Guillaume PENEL

Assesseurs : Docteur Philippe ROCHER

Docteur François BOSCHIN

Docteur Gilbert NAFASH